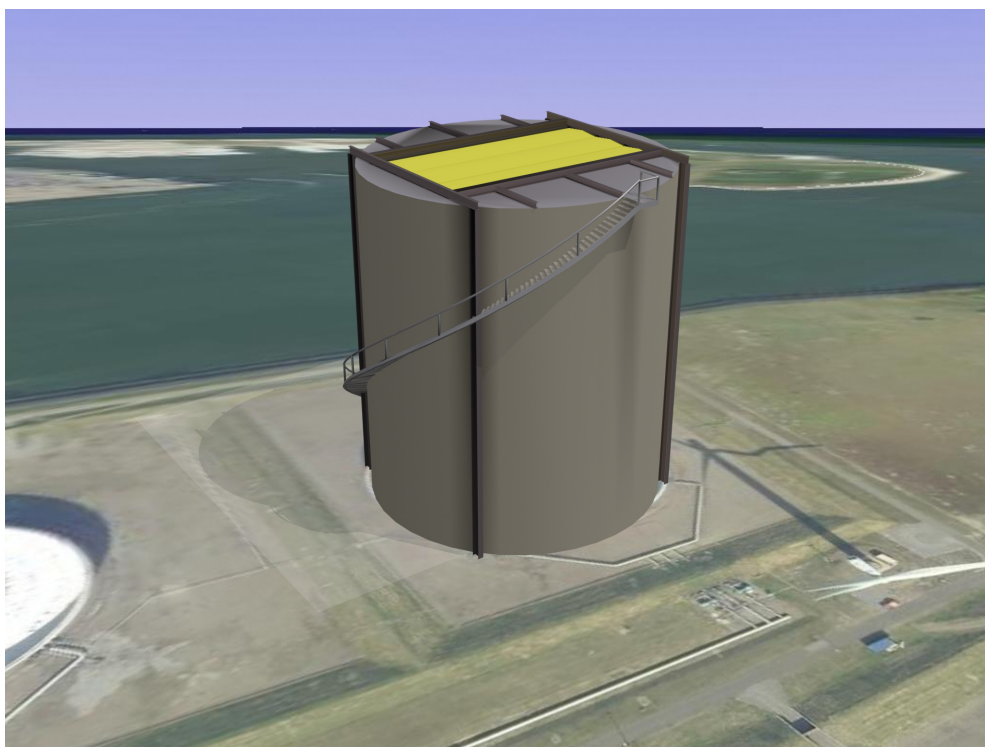


Eindrapport

Bachelor Eindwerk

Ontwerp van een dak- en settlerondersteuningsconstructie voor een bioreactor



Door: Wouter van Beerschoten
1185438

Datum: 20-10-2006

TU Delft - Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen
Sectie Constructie Mechanica

Begeleiders TU Delft: Dr.ir. P.C.J. Hoogenboom
Ir.ing. R. Abspoel
Begeleiders Biothane: Dhr. A. Mulder
Dhr. H. La Vos



Voorwoord

Voor u ligt het eindrapport van mijn Bachelor Eindwerk: “*Ontwerp van een dak- en settlerondersteuningsconstructie voor een bioreactor*”. Dit eindrapport bevat het resultaat van zeven weken ontwerpen, hetgeen is uitgevoerd in samenwerking met het bedrijf Biothane Systems International uit Delft.

Biothane levert over de hele wereld afvalwaterzuiveringinstallaties. Voor een stalen bioreactor wil het bedrijf een vergelijking van de mogelijkheden om het dak gasdicht af te sluiten en er 3 settlers in te kunnen hangen.

Voor biothane is al eerder een serie ontwerpen gemaakt, in juni 2005 door S. Kuipers. Dit betrof onderzoek om uit te zoeken welke vorm betonnen bezinktanks het gunstigst zouden zijn om toe te passen: rechthoekige of ronde. Uit dit onderzoek bleek dat ronde bezinktanks duidelijk de voorkeur hadden.

Veel dank ben ik verschuldigd aan dhr. A. Mulder en dhr. H. LaVos voor de begeleiding vanuit Biothane. Met de wekelijkse gesprekken en de vele mailtjes hebben zij mij alle informatie geleverd die ik nodig had voor dit ontwerp.

Ook wil ik graag ir. H.R. de Boer bedanken voor zijn adviezen over de dakconstructie en de informatie over de sandwichplaten. Verder wil ik ook dr.ir. P.C.J. Hoogenboom en ir.ing. R. Abspoel bedanken voor hun adviezen, tijd en moeite die ze hebben gestoken in mijn begeleiding.

Summary

Biothane is designing a round, steel reservoir for the waste water treatment. In this report the roof and settler supportstructure are optimized for reservoir of 15 meter in diameter and with a height of 18 meter. Three settlers are located at the top of the reservoir.

The formulation of the problem for this thesis is:

Design a support structure for the settlers and a roof for the reservoir, which satisfy the Specificatoins.

This design is divided in two parts, the roof for the reservoir and the support structure.

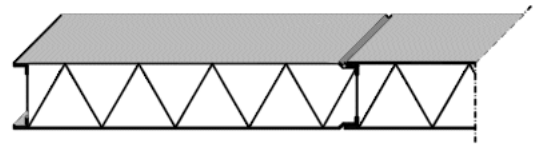
The roof of the reservoir has to withstand a pressure of 50 mbar. Four options for the roof are investigated:

1. A flat steel plate.
2. A flexible steel plate (membrane).
3. A corrugated steel plate.
4. A sandwich plate.

The sandwich plate shows to be the best design for the roof.

The flat steel plate has too much sag. The membrane structure is too flexible and it is not possible to walk on it. The corrugated steel plate is a good option, but it is more expensive than the

sandwich plate. The sandwich structure consists of a 1 mm thick stainless steel plate at the inside, a 100 mm thick isolation layer and a 2 mm steel plate on the outside.

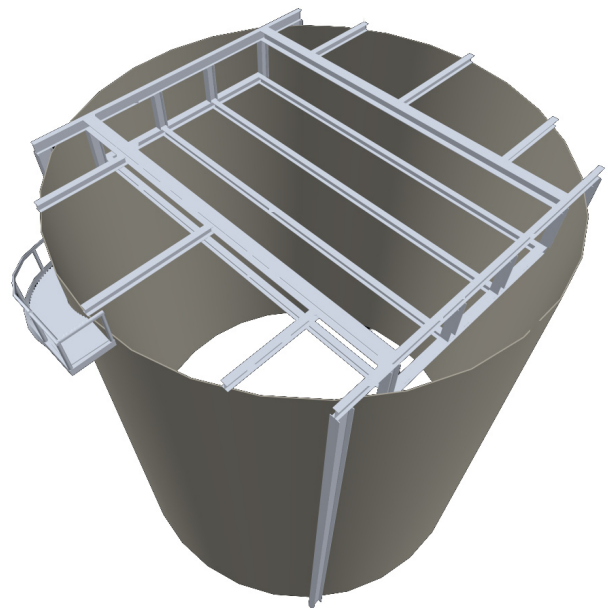


For the design of the support structure for the settlers there were three main options:

1. Placing columns in the reservoir.
2. Support on the wall of the reservoir,
3. Placing columns outside the reservoir.

Calculations showed that the columns in the reservoir are quite expensive, more than half of the costs of the total support structure. The support on the wall of the reservoirs resulted in a thicker wall at the top. Instead of 5 mm it became 7 mm thick. This meant that the prize of the reservoir wall increased over 5%. The best solution is to place the columns outside of the reservoir.

There were three options for placing the columns outside the reservoir. These had some price difference, but this difference is quite small in comparison with the total cost of the reservoir.



Inhoudsopgave

Voorwoord	3
Samenvatting	5
1. Inleiding	9
1.1 Werking bioreactor	9
1.2 Probleemstelling	9
1.3 Situatiebeschrijving	10
1.4 Leeswijzer	11
2. Programma van Eisen	13
3. Randvoorwaarden	15
4. Mogelijkheden voor de dakconstructie	17
4.1 Inleiding	17
4.2 Vier varianten	18
4.3 Overzicht	21
5. Mogelijkheden voor de ondersteuningsconstructie	23
5.1 Inleiding	23
5.2 Acht varianten	23
5.3 Overzicht	26
6. Conclusie	27
7. Aanbevelingen	29
8. Literatuurlijst	31
Bijlagen	33
A. Werkplan	35
B. Excel berekeningen	37
1. Opzet van de berekeningen	38
2. Parameters	39
3. Belastingen	40
4. Wanddikte reactor	41
5. Dak	44
6. Variant 2	48
7. Variant 3	58
8. Variant 5	61
9. Variant 6	63
10. Variant 7	64
11. Variant 8	67
12. Overzicht	70
13. HE Profielen	71
14. IPE profielen	72
C. Handberekeningen doorbuiging liggers	73
D. Tekening overzicht alternatieven	79

1. Inleiding

Dit Bachelor Eindwerk is uitgevoerd in opdracht van het bedrijf Biothane Systems International. Dit is een internationaal bedrijf dat over de hele wereld afvalwaterzuiveringsinstallaties ontwerpt en bouwt. De vestiging in Delft houdt zich momenteel bezig met het ontwerpen van een ronde, stalen bioreactor.

1.1 Werking bioreactor

De afvalwaterzuiveringsinstallaties werken volgens een anaëroob zuiveringsproces. In een bioreactor wordt het te zuiveren water onder in de bioreactor ingebracht door middel van een PVC verdeelsysteem. Dit water wordt omhoog gevoerd door een laag biomassa waar bacteriën actief zijn om het water te reinigen. Bij dit proces wordt biogas gevormd. Het water, biogas en biomassa bewegen gezamenlijk omhoog in de bioreactor.

Boven in de bioreactor bevindt zich een scheidingsinstallatie, een settler. Daar worden de volgende stoffen gescheiden:

- de biomassa-korrels bezinken weer;
- het biogas wordt via schuine platen langs de zijkant van de settler verzameld en kan worden gebruikt voor energieopwekking;
- het gezuiverde water wordt via een gotensysteem afgevoerd.

De settlers zijn zo ontworpen dat deze (gedemonteerd) in een zeecontainer passen. Voor dit ontwerp wordt gebruik gemaakt van settlers die in een 40 ft zeecontainer passen. Zie ook figuur 1.1.



Figuur 1.1 - Bovenkant van twee Settlers in China

1.2 Probleemstelling

De probleemstelling van dit eindwerk luid:

Ontwerp een ondersteuningsconstructie voor de settlers en een dakconstructie voor een bioreactor die voldoet aan het Programma van Eisen.

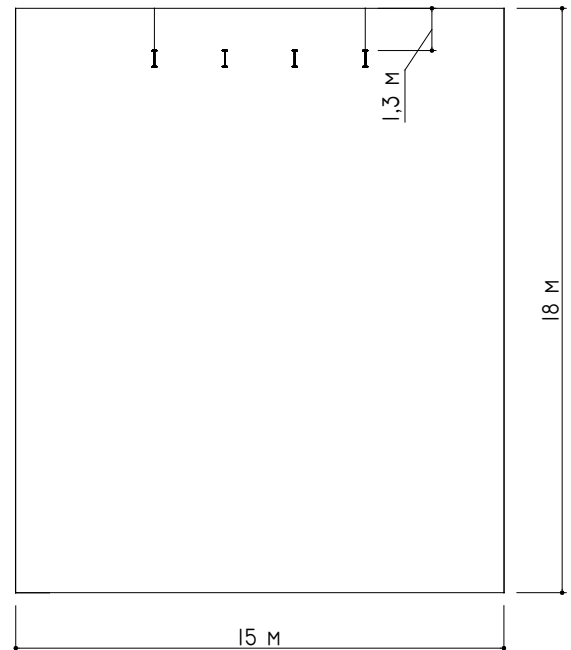
Deze ontwerpopdracht is gesplitst in twee delen, een ontwerp voor een ondersteuningsconstructie voor de settlers en een ontwerp voor de dakconstructie. Voor elk van deze onderdelen worden een aantal varianten ontworpen. Uit deze varianten wordt uiteindelijk één ontwerp verder uitgewerkt.

Er zijn al vele ontwerpen voor bioreactoren gemaakt, ook door Biothane. Wat bij deze opdracht anders is, is dat de settlers in dit geval van staal zijn, waar deze bij gelijksoortige bioreactoren van kunststof zijn. De kunststof settlers zijn een stuk lichter en kunnen op de reactorwand afgesteund worden. Stalen settlers zijn wel vaker toegepast, maar dan bij veel lagere bioreactoren en met een aparte ondersteuning naar de bodem van de reactor.



Figuur 1.2 - Bioreactor in China

Tot nu toe is er nog maar één bioreactor gemaakt met stalen settlers in zo'n hoge reactor. Dit betreft een bioreactor in China, waarbij de settlers op de wand zijn afgesteund. Deze reactor is echter vierkant en van beton (met een wanddikte van meer dan 1 meter), zie figuur 1.2.

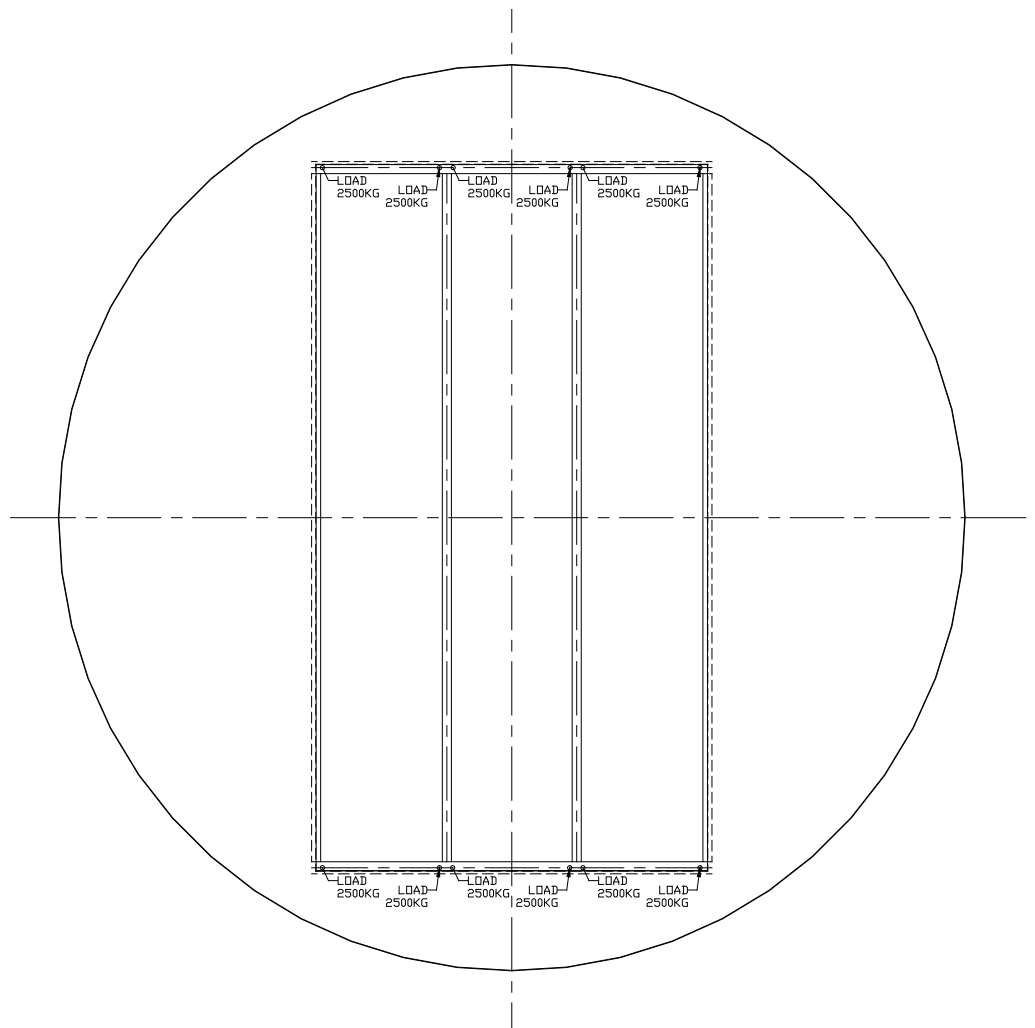


Ook voor dakconstructies van ronde reactoren zijn al vele ontwerpen gemaakt, denk aan een vakwerksysteem, een conevormig (of domevormig) dak of een drijvend dak. Deze opties zijn voor deze bioreactor niet mogelijk omdat de settlers van buitenaf toegankelijk moeten zijn voor personen. Verder levert de ronde vorm van de reactor met de rechthoekige settlers erin een interessant ontwerpprobleem.

1.3 Situatiebeschrijving

In figuur 1.3 is te zien hoe de bioreactor er in doorsnede uit ziet. De bioreactor is 18 meter hoog en heeft een diameter van 15 meter. De settlers worden ondersteund door een raamwerk op 1,3 meter onder de bovenkant (de settlers zitten dus grotendeels in de reactor). In figuur 1.4 is te zien hoe dit raamwerk eruit ziet. Er zijn 4 dwarsliggers die moeten zorgen voor een waterdichte afsluiting tussen de settlers en het dak en er zijn twee liggers waar de settlers op steunen. De settlers wegen 10 ton per stuk steunen op de vier hoekpunten op de ligger.

Figuur 1.3 - Doorsnede bioreactor



Figuur 1.4 - Bovenaanzicht bioreactor met raamwerk voor ondersteuning settlers

Rondom de settlers moet een verticale wand komen tot aan het dak. Deze wand (en het dak) moeten gasdicht zijn, omdat er voor het verdere transport van het biogas een overdruk in de reactor nodig is.

1.4 Leeswijzer

Dit rapport begint met het voorwoord, een engelstalige samenvatting en deze inleiding. Hierna komt het programma van eisen en de randvoorwaarden. Hierin wordt de ontwerpopgave afgebakend en worden de benodigde belastingen gedefinieerd.

In hoofdstuk 4 worden er 4 mogelijkheden voor de dakconstructie bekeken. Deze worden hier tekstueel toegelicht, de berekeningen zijn in de bijlage (B-4) te vinden, om het verslag beter leesbaar te houden. Uit deze 4 mogelijkheden blijkt één variant het beste te zijn. Deze variant wordt gebruikt voor de het ontwerp van de ondersteuningsconstructie.

Dit ontwerp wordt toegelicht in hoofdstuk 5. Hier worden 8 mogelijkheden bekeken voor de ondersteuning van de settlers. Deze mogelijkheden worden toegelicht aan de hand van de gemaakte berekeningen, welke staan in bijlage B. De belangrijkste resultaten van de berekeningen worden wel genoemd in hoofdstuk 5. In de laatste paragraaf van hoofdstuk 5 worden de verschillende mogelijkheden met elkaar vergeleken op basis van de kostprijs van de materialen.

Hoofdstuk 6 bevat de conclusies van dit ontwerp. Hoofdstuk 7 bevat aanbevelingen voor vervolg onderzoek, naar aanleiding van problemen en beperkingen bij dit ontwerp. Hoofdstuk 8 is de literatuurlijst. Als laatst zijn er nog een aantal bijlagen toegevoegd met het werkplan, de berekeningen die in Excel zijn gemaakt, de handberekeningen en de handtekeningen. Ook zit achterin dit rapport een cd-rom met het Excel bestand met alle berekeningen, het 3D AutoCAD model en de digitale versie van dit rapport.

2. Programma van Eisen

Hieronder volgt een opsomming van de belangrijkste eisen waar tijdens het ontwerp rekening mee moet worden gehouden. Deze eisen zijn opgesplitst in 6 categorieën.

ALGEMEEN

- 1.1 Een lage kostprijs (berekening door middel van kiloprijzen) is belangrijk.
- 1.2 Er moet rekening gehouden worden met de uitvoeringsaspecten.
- 1.3 De bioreactor heeft een ontwerplevensduur van minimaal 10 jaar.

NORMEN

- 2.1 Waar mogelijk moet voldaan worden aan de Amerikaanse norm API 650.
- 2.2 Verder moet de constructie voldoen aan de Nederlandse NEN-normen of Eurocode.

BELASTINGEN

De constructie moet de volgende belastingen kunnen opnemen:

- 3.1 Windzuiging op het dak.
- 3.2 Sneeuw op het dak (volgens de Nederlandse normen).
- 3.3 Onderdruk in de bioreactor tijdens het leeglopen.
- 3.4 Overdruk in de bioreactor tijdens het zuiveringsproces, waarbij biogas wordt geproduceerd.
- 3.5 Het gewicht van de settlers.
- 3.6 Personen en materialen op het dak.

MATERIALEN

- 4.1 In de bioreactor moet rvs toegepast worden wegens het corrosieve milieu.
- 4.2 De reactorwand en de binnenkant van de dakconstructie moeten in rvs uitgevoerd worden.
- 4.3 Van het r vrs wordt de variant 316L gebruikt.
- 4.4 Van het (constructie-) staal wordt de variant S235 gebruikt.

SETTLERS

- 5.1 Deze zijn zelfdragend, ondersteuning op de 4 hoekpunten is voldoende. Voor een waterdichte afsluiting is het wel noodzakelijk dat de settlers over de gehele omtrek op een staalprofiel steunen.
- 5.2 Er zijn 3 settlers aanwezig in de reactor.
- 5.3 De settlers moeten voor personen via het dak bereikbaar zijn i.v.m. onderhoud.
- 5.4 De settlers moeten waterpas blijven.

BIOREACTOR

- 6.1 De bioreactor moet gasdicht zijn.
- 6.2 Het dak moet een afschot voor regenwater hebben.
- 6.3 Rondom de bioreactor moet een trap geplaatst kunnen worden.

3. Randvoorwaarden

Naast een Programma van Eisen (PvE) zijn er ook randvoorwaarden waar rekening mee moet worden gehouden. Deze zijn in dezelfde categoriën ingedeeld als het PvE

ALGEMEEN

-

NORMEN

-

BELASTINGEN

- | | | |
|-----|-------------------------------------|--|
| 3.1 | Windzuiging (dak) | Gebied I onbebouwd, hoogte = 17 m geeft $p_w = 1,23 \text{ kN/m}^2$
$p_{\text{rep}} = C_i * p_w = -0,7 * 1,23 = -0,86 \text{ kN/m}^2$ |
| 3.2 | Sneeuw | $p_{\text{rep}} = C_i * p_{\text{sn,rep}} = 0,8 * 0,7 = 0,56 \text{ kN/m}^2$ |
| 3.3 | Onderdruk in de bioreactor (5 mbar) | 5 mbar = $0,5 \text{ kN/m}^2$ |
| 3.4 | Overdruk in de bioreactor (50 mbar) | 50 mbar = 5 kN/m^2 |
| 3.5 | Gewicht settlers | 4 hoekpunten met elk 25 kN (2,5 ton). |
| 3.6 | Personen en materialen: | $p_{\text{rep}} = 1,0 \text{ kN/m}^2$ |

MATERIALEN

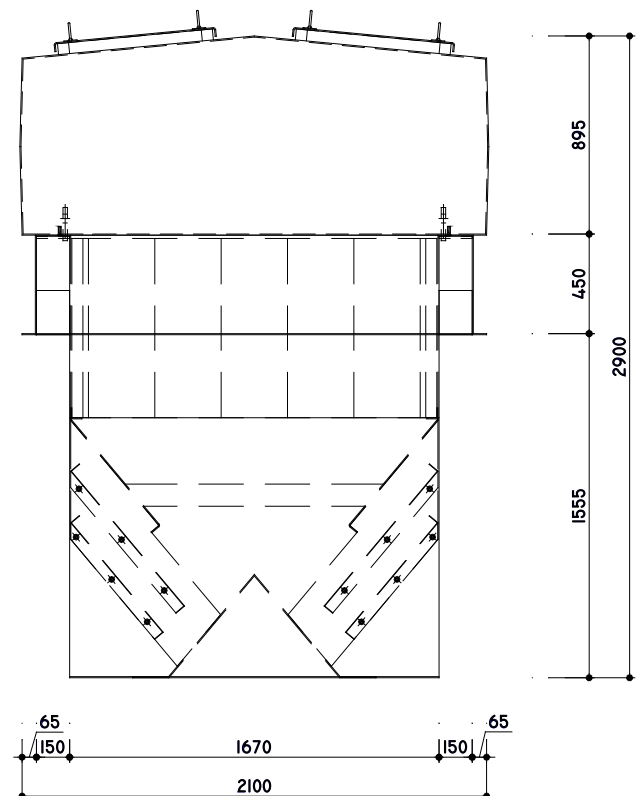
-

SETTLERS

- 5.1 Hebben een gewicht van 10 ton per stuk.
- 5.2 Zie figuur 3.1 voor de afmetingen.
- 5.3 Settlers hebben een lengte van 11820 mm, met een oplegbreedte van 60 mm aan de kopse kant.

BIOREACTOR

- 6.1 Inhoud van de bioreactor: 3000 m^3 .
- 6.2 Reactordiameter: 15 m.
- 6.3 Waterhoogte: 17 m.

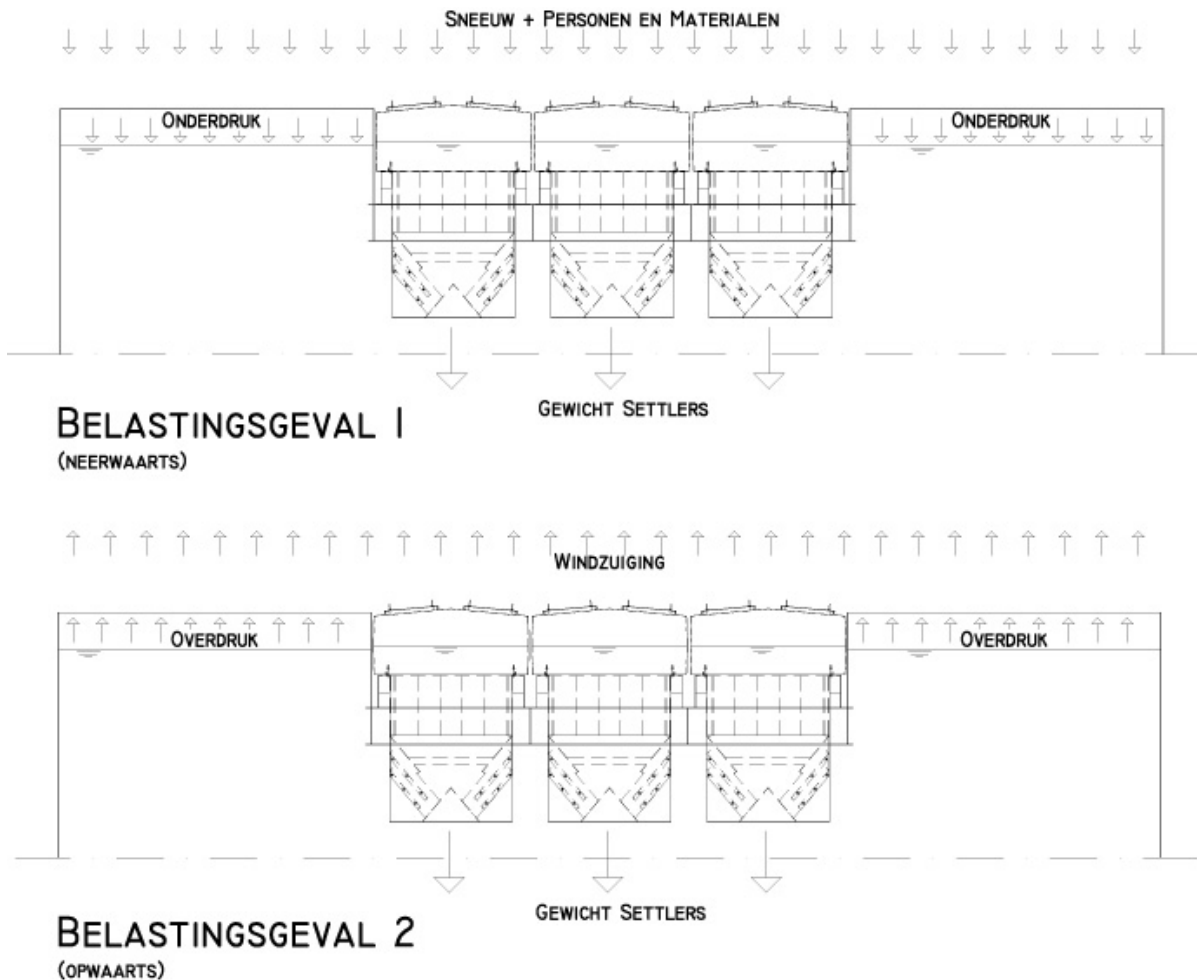


Figuur 3.1 - Zijaanzicht Settler

4. Mogelijkheden voor de dakconstructie

4.1 Inleiding

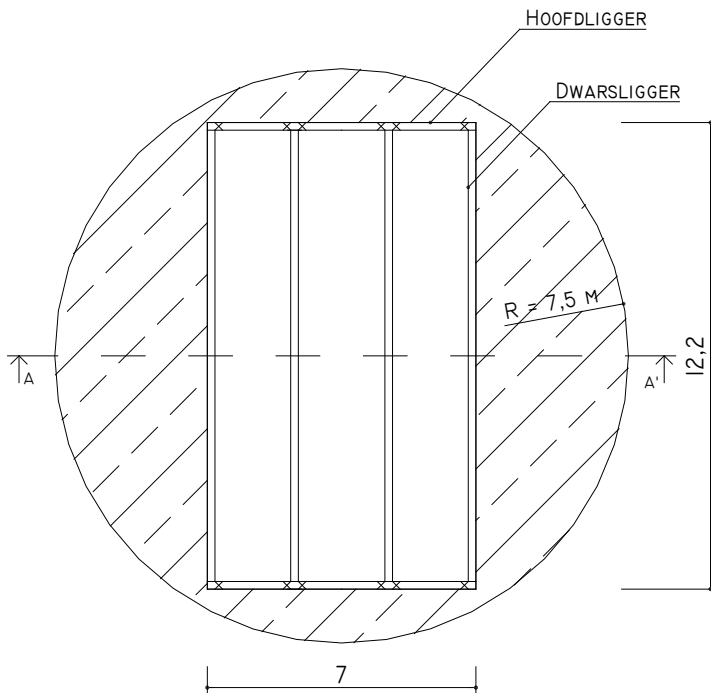
De combinatie van een ronde bioreactor met overdruk en rechthoekige settlers erin, levert een uitdagend probleem op voor de dakconstructie. Voor het dak gelden er twee maatgevende belastingsgevallen. Het eerste belastingsgeval levert een druk op van $3,1 \text{ kN/m}^2$ naar beneden (sneeuw, overdruk en personen en materialen), en het tweede belastingsgeval een druk van $8,8 \text{ kN/m}^2$ omhoog (overdruk en windzuiging). In figuur 4.1 zijn deze belastingsgevallen weergegeven.



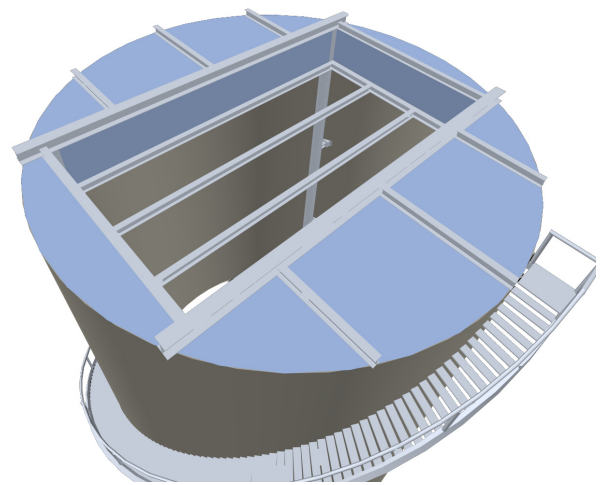
Figuur 4.1 - Belastingsgevallen

Tevens is figuur 4.1 een doorsnede (A-A') van de reactor, zie figuur 4.2 op de volgende pagina. De settlers hangen midden bovenin de reactor. Iedere settler steunt op de vier hoekpunten, de kruisjes in figuur 4.2, op de hoofdliggers. Het getekende raamwerk (van dwarsliggers) zorgt voor een waterdichte afsluiting tussen de settlers en het dak. Hier wordt nu gekeken naar de dakconstructie, voor het gearceerde gedeelte van figuur 4.2 en het blauwe gedeelte van figuur 4.3.

Voor de dakconstructie zijn er een aantal eisen. De binnenkant moet van RVS zijn (PvE 4.2). De doorbuiging mag niet te groot zijn (PvE 2.2, norm: $1/250 \cdot \text{lengte van de overspanning}$). En het dak moet gasdicht zijn (PvE 6.1).



Figuur 4.2 - Layout dak



Figuur 4.3 - Dakconstructie

4.2 Vier varianten

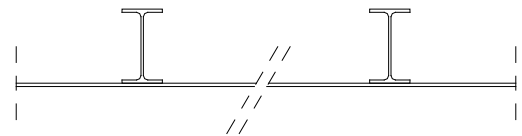
Er zijn een aantal varianten voor de dakconstructie:

1. een vlakke rvs plaat (belast op buiging);
2. een flexibele rvs plaat als membraan;
3. een geprofileerde rvs plaat;
4. een sandwich dakplaat.

Een vlakke rvs plaat

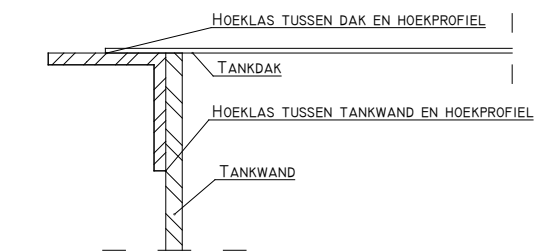
Voor de eerste optie wordt uitgegaan van een h.o.h. afstand van 1 meter tussen de dwarsliggers, zie figuur 4.4. Uit een kleine berekening (bijlage B-5) volgt dat er dan een plaatdikte van 5,9 mm nodig is, om de benodigde sterkte te kunnen leveren. Maar deze plaat voldoet nog niet aan de doorbuigingseis. De aansluiting op de reactorwand is geen probleem, dat kan gebeuren door middel van een lasverbinding, zie figuur 4.5. Wegens de benodigde hoeveelheid rvs is deze variant geen goede optie.

Figuur 4.4 - Vlakke rvs plaat

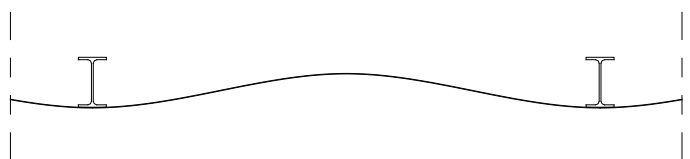


Een flexibele rvs plaat als membraan

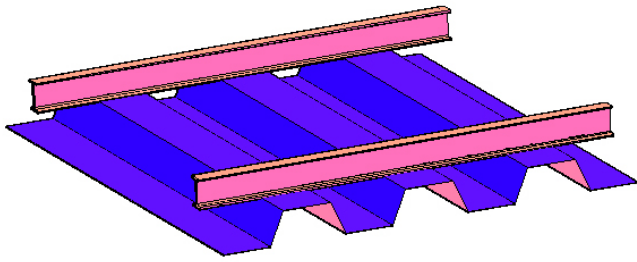
Voor de tweede optie is een iets uitgebreidere berekening nodig (bijlage B-5). Als de dwarsliggers een h.o.h. afstand van 2,5 meter hebben, dan kan er met een plaatdikte van 0,8 mm volstaan worden. Maar hier zitten echter een aantal nadelen aan. Om tot een goede (membraan)werking te komen heeft de plaat opbolling nodig, zie figuur 4.6. In dit geval is dat 50 mm. Door drukwisselingen in de bioreactor is er kans dat de plaat deze opbolling afwisselend



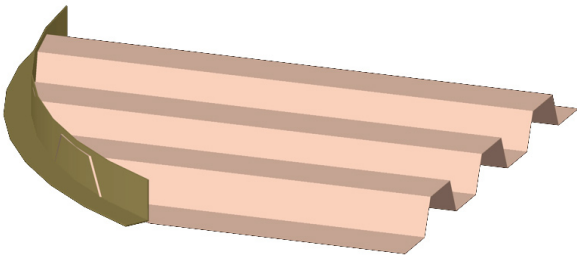
Figuur 4.5 - Aansluiting vlak dak op reactorwand



Figuur 4.6 - Membraan dak



Figuur 4.7 - Geprofileerde RVS-plaat



Figuur 4.8 - Hoekprofiel om geprofileerde RVS-plaat

naar boven en naar beneden krijgt. Hierdoor kan er vermoeiing optreden in het staal, en zal er veel aandacht aan de verbindingen besteed moeten worden. Een ander punt is dat er over zulk dun staal niet te lopen valt en het tijdens de montage erg kwetsbaar is.

Een geprofileerde rvs plaat

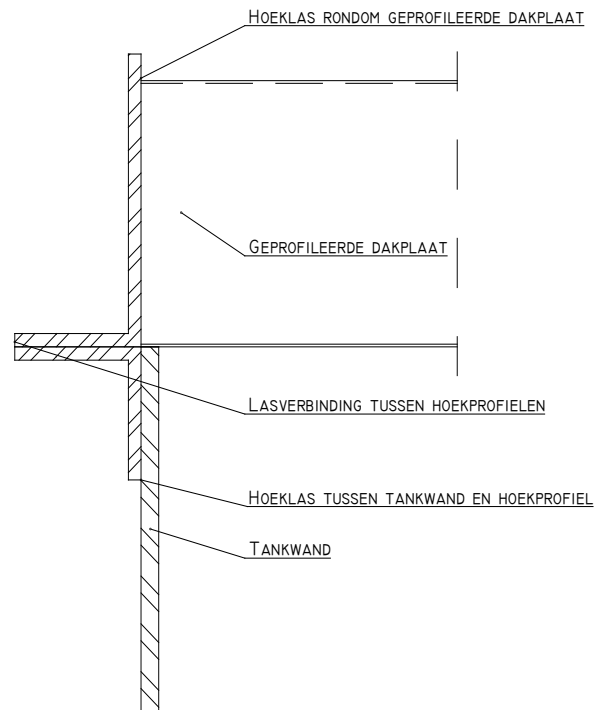
Een geprofileerde rvs plaat, zie figuur 4.7, heeft voordelen ten opzichte van een vlakke plaat. Door de hoogte is de plaat veel stijver, waardoor de doorbuiging veel minder is en de overspanning dus groter kan zijn. Maar door de profilering moet de rvs plaat wel bewerkt worden. Bovendien vraagt de aansluiting op de reactorwand vanwege die profilering om een aparte oplossing, bijvoorbeeld door een hoekprofiel rondom de platen te lassen, zie figuur 4.8 en figuur 4.9.

Bij een profiel met een hoogte van 150 mm en een breedte van 200 mm (plaatdikte van 1 mm) is het mogelijk om de dwarsliggers 3,5 meter h.o.h. te plaatsen (bijlage B-5). De doorbuiging voldoet dan aan de eis.

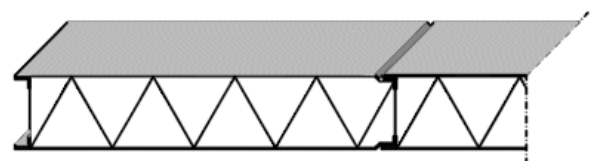
Een sandwich dakplaat

Om minder rvs te gebruiken en toch een grote buigstijfheid te krijgen kan een sandwichplaat gebruikt worden. Tussen de platen kan bijvoorbeeld Polyurethaanschuim worden gespoten. Een andere mogelijkheid is om platen vastgelijmd worden, zie figuur 4.10. Het voordeel is dat er alleen aan de onderkant rvs nodig is. Aan de bovenkant kan gewoon staal gebruikt worden, omdat dit niet in contact komt met de inhoud van de bioreactor. Hierdoor is er bijna 43% minder rvs nodig dan bij de geprofileerde dakplaat (met dezelfde dikte). Een bijkomend voordeel is dat het schuim ook als isolatie fungeert bij lage buitentemperaturen.

Als we een sandwich dakplaat nemen met een dikte van 100 mm, dan kunnen de dwarsliggers 3 meter h.o.h. staan, terwijl nog steeds voldaan wordt aan de doorbuigingseis. Om een gasdichte afsluiting te krijgen zal goed gekeken moeten worden naar de aansluitingen tussen de sandwich platen. Op de volgende pagina is dit verder uitgewerkt.



Figuur 4.9 - Doorsnede aansluiting dak op reactorwand



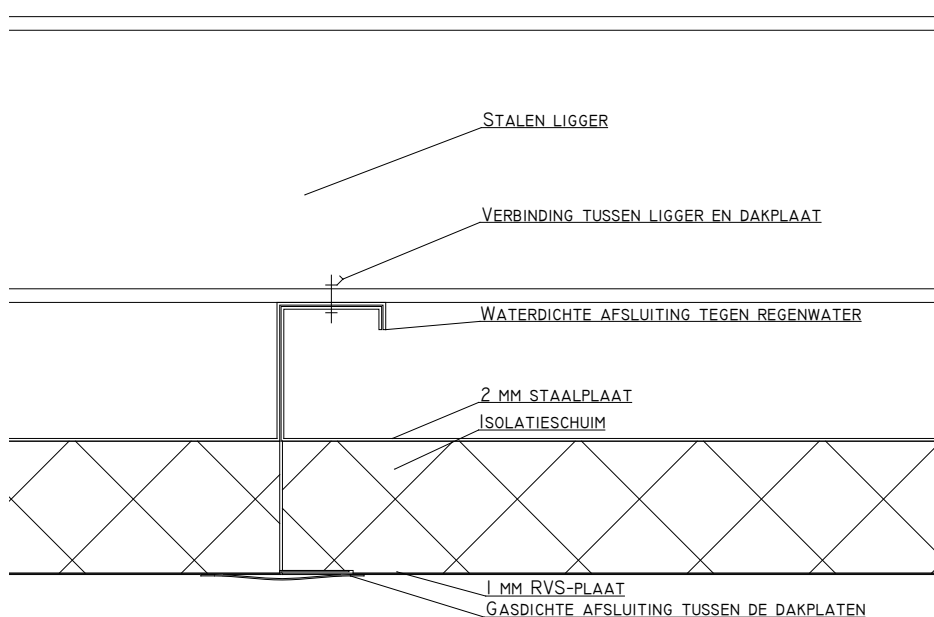
Figuur 4.10 - Sandwich dakplaat

De aansluitingen van de sandwichplaten in de langsrichting staat uitgewerkt in figuur 4.11. Voor de gasdichte afsluiting is er een strip aan de binnenkant van de sandwichplaten gelast. Deze kan door middel van een vacuümdoos getest worden, zie figuur 4.12.

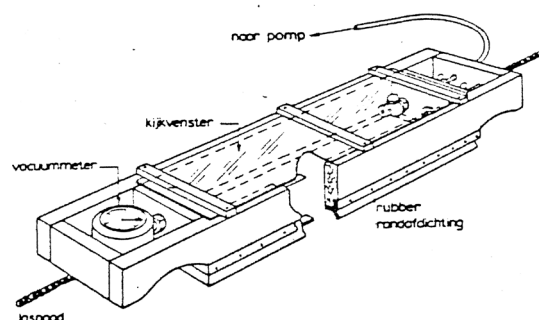
Met een pomp kan een geringe onderdruk in de doos gebracht worden. Van tevoren is de te controleren lasnaad met zeepsoep ingesmeerd. Als een lek in de naad aanwezig is en de vacuümdoos erop wordt geplaatst, zullen door de onderdruk in de doos luchtbellen op de plaats van het lek ontstaan.

De sandwichplaat is opgebouwd uit 1 mm RVS-plaat, 100 mm isolatieschuim en 2 mm staalplaat. Aan de randen is de staalplaat omhoog gevouwen om samen met de rand van de aansluitende staalplaat een waterdichte afsluiting te vormen. Tevens kan de rand gebruikt worden voor de bevestiging van de sandwichplaten aan de dakconstructie. Dit kan door middel van bouten, zoals in figuur 4.11, of door middel van speciale klemmen. De klemmen kunnen om de onderflens van de ligger en de rand van de sandwichplaat geklikt worden.

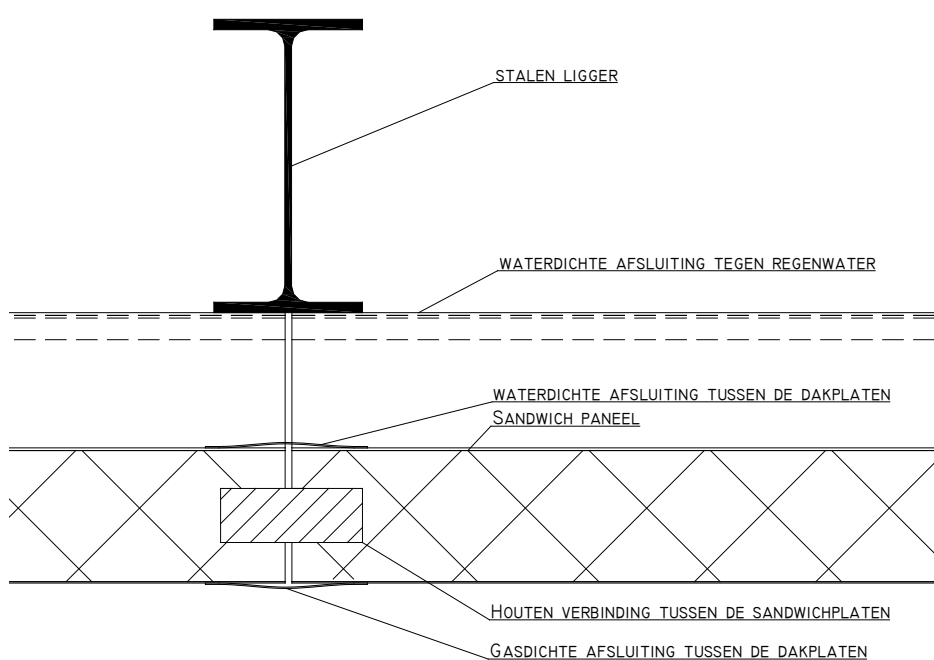
Ter plaatse van de bevestigingen kunnen door de belasting op de sandwichplaat piekspanningen ontstaan en kan het isolatieschuim losscheuren van de staalplaat. Of de 2 mm staalplaat dit houdt, zou verder uitgezocht kunnen worden. In figuur 4.13 valt te zien hoe de aansluiting op de kopse kanten van de sandwichplaten gemaakt kan worden. Aan de binnenkant wordt weer een strip gelast. Aan de buitenkant kan hetzelfde gedaan worden voor een waterdichte afsluiting. Om onderlinge samenhang te krijgen tussen de sandwichplaten kan er een houtverbinding toegepast worden.



Figuur 4.11 - Langsaansluiting sandwichplaten



Figuur 4.12 - Vacuümdoos



Figuur 4.13 - Kopaansluiting sandwichplaten

4.3 Overzicht

Optie	kg RVS per m ²	h.o.h dakliggers	opmerkingen
enkele rvs plaat	46,7	1 m	Voldoet niet aan doorbuigingseis (berekend op sterkte).
flexibele rvs plaat (membraan)	6,3	2,5 m	Voldoet niet aan doorbuigingseis, en vraagt om veel detaillering voor de aansluitingen.
geprofileerde rvs plaat	13,7	3,5 m	De gasdichte aansluiting op reactorwand is niet eenvoudig.
sandwich dakplaat	7,9	2,5 m	De gasdichte afsluiting moet goed gedetailleerd worden. Isolatie in het dak kan handig zijn ivm temperatuursverschillen.

Uit dit ontwerp en de bijbehorende berekeningen kan geconcludeerd worden dat de sandwichplaat erg gunstig is. De doorbuiging is gering en het schuim tussen de dakplaten kan ook als isolatie werken bij lage buiten temperaturen. In het vervolg van dit ontwerp wordt uitgegaan van de sandwich dakplaat.

Ter ondersteuning van de dakplaten is ervoor gekozen om de liggers aan de buitenkant te plaatsen. Hierdoor hoeven deze liggers niet van rvs te zijn, en is de luchtdichte afsluiting beter te realiseren. Rondom de settlers zijn ook nog verticale dakplaten geplaatst, zie figuur 4.3, om de luchtdichte afsluiting tussen het dak en de ondersteuningsconstructie van de settlers te verzorgen.

De montage van de bioreactor geschied door eerst één rand te lassen, hier het dak op te plaatsen, en daarna dit geheel op te krikken zodat er een volgende rand onder gelast kan worden, zie figuur 4.11. Het dak kan eerst op de grond gemaakt worden, en daarna met een kraan op de eerste rand van de reactor geplaatst worden, zie figuur 4.12. Het proces van opkrikken en een rand vastlassen herhaalt zich een aantal keer. Nadat de bioreactor gebouwd is, kunnen de settlers op hun plek gehesen worden.



Figuur 4.11 - Montage reactorwand



Figuur 4.12 - Plaatsing reactordak

5. Mogelijkheden voor de ondersteuningsconstructie

5.1 Inleiding

Voor het zuiveringsproces in de bioreactor is het noodzakelijk dat er 3 settlers boven in de tank zitten. Om de settlers op hun plek te houden is een ondersteuningsconstructie nodig. Voor deze ondersteuningsconstructie zijn acht varianten ontworpen. Het raamwerk waar de settlers op steunen is bij alle varianten aanwezig, omdat dit nodig is voor de waterdichte afsluiting tussen de settlers en de rest van de constructie.

De acht varianten zijn in te delen in drie groepen. De eerste groep heeft kolommen in de reactor (varianten 1 en 2). Bij de tweede groep wordt de belasting van de settlers afgedragen op de tankwand, hierbij zijn dus geen kolommen aanwezig (varianten 3,4 en 5). Bij de laatste groep zijn er wel kolommen aanwezig, maar zijn deze aan de buitenkant van de reactor geplaatst (varianten 6,7 en 8). Op de tekeningen in bijlage D zijn de acht varianten getekend.

5.2 Acht varianten

De acht varianten zijn:

1. Directe ondersteuning met stabiliteitsverbanden;
2. Directe ondersteuning met stabiliteit aan de reactorwand;
3. Ondersteuning op de reactorwand;
4. Verbeterde ondersteuning op de reactorwand;
5. Vakwerk ondersteuning op de reactorwand;
6. Ondersteuning op verstevigde reactorwand;
7. Ondersteuning buiten de reactor;
8. Verbeterde ondersteuning buiten de reactor.

Hieronder volgt een omschrijving van de varianten.

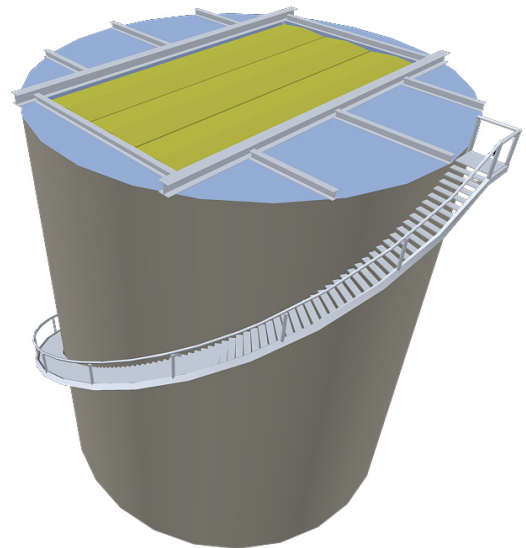
1. Directe ondersteuning met stabiliteitsverbanden

Onder de 4 hoekpunten van het raamwerk waar de settlers op staan, komt een kolom naar de fundering. Om de stabiliteit te waarborgen zijn kruisverbanden geplaatst. In de lengterichting (van de settlers) wordt de stabiliteit verzorgd door momentvaste verbindingen. De kolommen lopen door tot het dak en ondersteunen deze ook. De staalconstructie is nagenoeg identiek aan variant 2, zie figuur 5.2. Het verschil is dat er bij deze variant stabiliteitsverbanden zijn. Deze stabiliteitsverbanden zijn van rvs, omdat deze in de reactor zitten. Dit maakt deze variant per definitie duurder dan variant 2. Daarom is deze variant niet verder uitgewerkt.

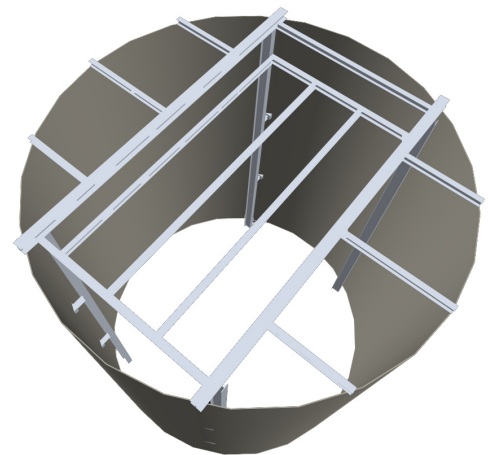
2. Directe ondersteuning met stabiliteit aan de reactorwand

Onder de 4 hoekpunten van de settlers staat een kolom naar de fundering. Voor de stabiliteit worden de kolommen in het midden verbonden met de reactorwand. Het voordeel hiervan is dat de kniklengte gehalveerd wordt, en er dus minder materiaal nodig is.

De kolommen lopen nog een stukje door tot aan het dak. Hier ondersteunen ze de dakconstructie. Deze dakconstructie bestaat uit een viertal liggers die rondom de settlers lopen, en steun bieden



Figuur 5.1 - Buitenkant bioreactor



Figuur 5.2 - Staalconstructie variant 2

aan de verticale dakplaten (eigenlijk wanden) die tussen het dak en de ondersteuning van de settlers hangen. Naast deze vier liggers zijn er nog zes liggers waar de dakplaten aan hangen. Deze liggers verkleinen de overspanning van de dakplaten. Figuur 5.2 geeft de staalconstructie in de reactor weer.

In bijlage B-6 wordt de staalconstructie verder uitgewerkt. Hieruit blijkt dat de rvs kolommen meer dan de helft van de kosten van de totale staalconstructie zijn. Ook de rvs ondersteuning van de settlers is een grote kostenpost, wegens de hoge rvs prijs.

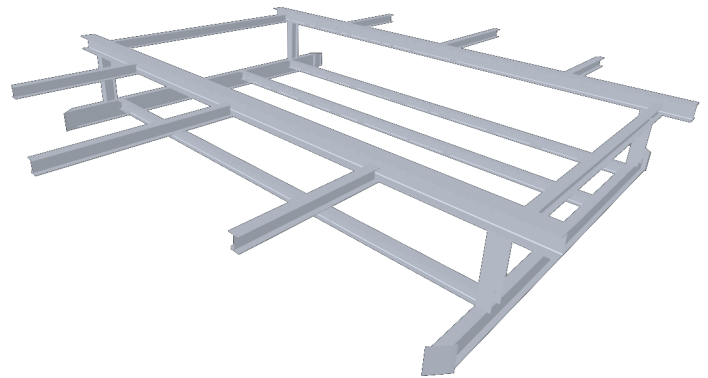
3. Ondersteuning op de reactorwand

De liggers die de settlers ondersteunen kunnen, als deze iets langer zijn, direct op de reactorwand steunen. Hiervoor is dan wel een stevig rvs-profiel nodig, vanwege de doorbuiging. Er zijn dan geen kolommen nodig. Een nadeel is dat er op de reactorwand grote krachten komen te staan, waardoor deze bovenaan dikker (dus duurder) uitgevoerd moet worden.

In bijlage B-4 wordt berekend wat de wanddikte van de reactor kan zijn met en zonder een extra puntlast. Bovenaan scheelt dit een dikte van 2 mm, wat ruim € 24.000 extra aan materiaal kost.

In bijlage B-7 wordt onder andere de ligger doorgerekend. Hiervoor zijn twee IPE600 profielen nodig, wat meer dan de helft van de kosten van de totale staalconstructie is.

In variant 5 wordt gekeken of een vakwerk deze IPE600 ligger kan vervangen en of dat dan goedkoper is.



Figuur 5.3 - Variant 3

4. Verbeterde ondersteuning op de reactorwand

Net als bij variant 3 een ligger die op de reactorwand steunt. Om het formaat van de ligger te kunnen reduceren, en om de krachten in de reactorwand te spreiden wordt de ligger ondersteund door 2 diagonalen. Eventueel is er nog een trekstang toe te voegen om de horizontale krachten uit de diagonalen op te nemen, zie de tekening in bijlage D.

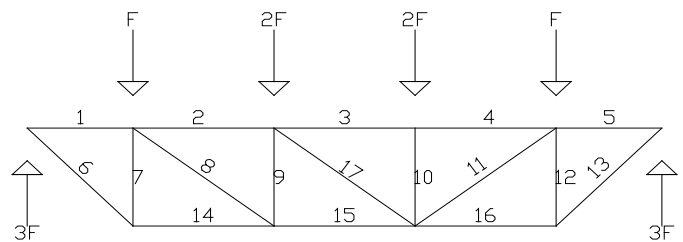
Uit berekeningen met een raamwerkprogramma blijkt dat de krachten grotendeels opgenomen worden door de diagonalen. Daardoor worden de krachten op de reactorwand nauwelijks gespeid. Bij bepaalde configuraties van diagonalen komen er zelfs trekkrachten in de verbinding van de hoofdligger met de reactorwand.

Omdat deze optie niet zo gunstig is als gedacht, omdat er nog steeds grote puntlasten in de reactorwand optreden, is deze optie niet verder uitgewerkt.

5. Vakwerk ondersteuning op de reactorwand

In plaats van een enkele ligger, zoals bij variant 3, worden de settlers nu ondersteund door een vakwerk, zie figuur 5.4. Dit vakwerk wordt niet zwaar belast en kan grotendeels bestaan uit IPE140 profielen (zie berekeningen bijlage B-8).

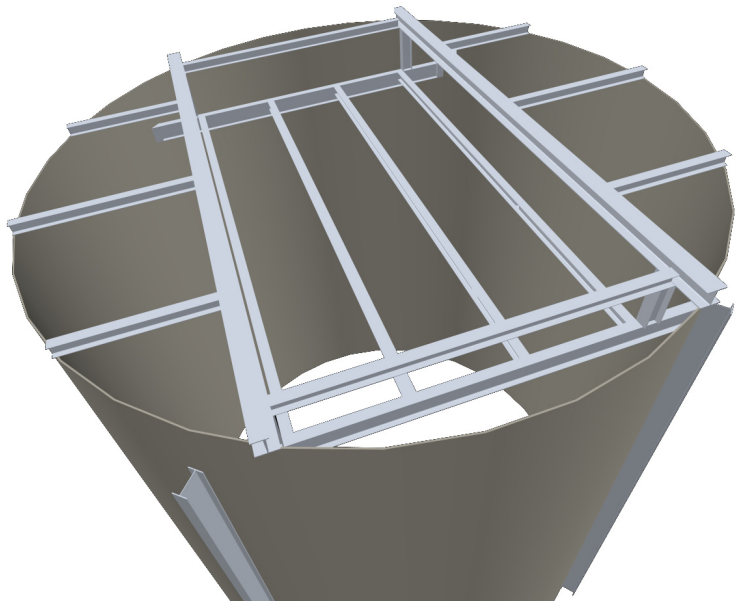
Deze optie is door het vakwerk goedkoper dan variant 3. Maar vanwege de puntlasten op de reactorwand is er ook hierbij een dikkere reactorwand nodig. Hierdoor blijft dit een duurdere oplossing, t.o.v. de andere varianten.



Figuur 5.4 - Variant 5

6. Ondersteuning op verstevigde reactorwand

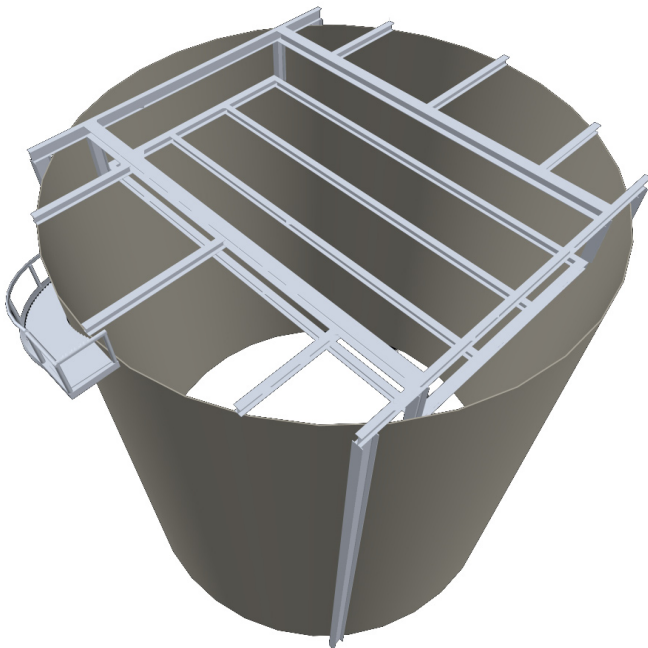
Deze variant heeft grotendeels dezelfde ondersteuningsconstructie als bij variant 3. Het verschil is dat er nu extra kolommen aan de buitenkant van de reactorwand staan, zie figuur 5.5. De kracht uit de hoofdligger wordt door de kolom opgenomen en niet door de reactorwand. Hierdoor hoeft de reactorwand niet dikker uitgevoerd te worden. De kolommen aan de buitenkant kunnen van gewoon staal gemaakt worden, en brengen hierdoor weinig extra kosten met zich mee (zie ook bijlage B-9).



Figuur 5.5 - Variant 6

7. Ondersteuning buiten de reactor

Aangezien de kolommen *in* de reactor van rvs gemaakt moeten worden, is het goedkoper om de kolommen buiten de reactor te plaatsen. Deze variant heeft 4 kolommen aan de buitenkant van de reactorwand staan. De kolommen zijn vastgemaakt aan de reactorwand zodat knik niet maatgevend wordt. Aan de bovenkant zijn de kolommen verbonden door liggers. Aan deze liggers hangt op 4 plekken de ondersteuningsconstructie van de settlers. Ook ondersteunen deze liggers de dakconstructie.



Figuur 5.6 - Variant 7

Uit de berekeningen in bijlage B-10 blijkt dat de kolommen nu maar een klein deel van de kosten van de staalconstructie zijn.

Een groter deel wordt gevormd door de liggers die de settlers ondersteunen. Deze liggers worden aan de uiteinden door hangers verbonden met de ligger op het dak. In variant 8 wordt gekeken of dit goedkoper kan.

8. Verbeterde ondersteuning buiten de reactor

Deze variant is grotendeels hetzelfde als variant 7, maar heeft extra verbindingen tussen de dakliggers en de ondersteuningsconstructie van de settlers, zie figuur 5.7. De ondersteuningsconstructie van de settlers kan in dit geval lichter uitgevoerd worden. Dit scheelt veel in kosten aangezien de ondersteuningsconstructie van rvs is. Uit de berekeningen (zie bijlage B-11), blijkt dat de ligger nu een IPE180 profiel kan zijn in plaats van een IPE450. Dit scheelt veel meer in kosten, dan dat de extra hangers kosten. De ligger buiten de reactor moet één maat groter uitgevoerd te worden.

Deze variant is dus zeker goedkoper dan variant 7. Een nadeel zou kunnen zijn dat vanwege de extra hangers de luchtdichte afsluiting wat lastiger te realiseren is.

5.3 Overzicht

In onderstaande tabel staat het resultaat van alle berekeningen in bijlage B. Van de varianten die uitgewerkt zijn, zijn de kosten voor de ondersteuningsconstructie bekend. De kosten van het dak zijn voor alle varianten hetzelfde, aangezien de oppervlakte van de dakplaten gelijk blijft. Bij sommige varianten is de manier van ondersteuning van het dak wel anders, maar dit verschil zit verwerkt in de kosten van de ondersteuningsconstructie.

De reactorwand blijkt de grootste kostenpost te zijn, omdat deze compleet van rvs is. Bij variant 3 en 5 zijn de kosten voor de reactorwand ruim € 24.000 hoger omdat de reactorwand bovenaan dikker moet zijn om de voorkomen dat deze bezwijkt onder de puntlasten.

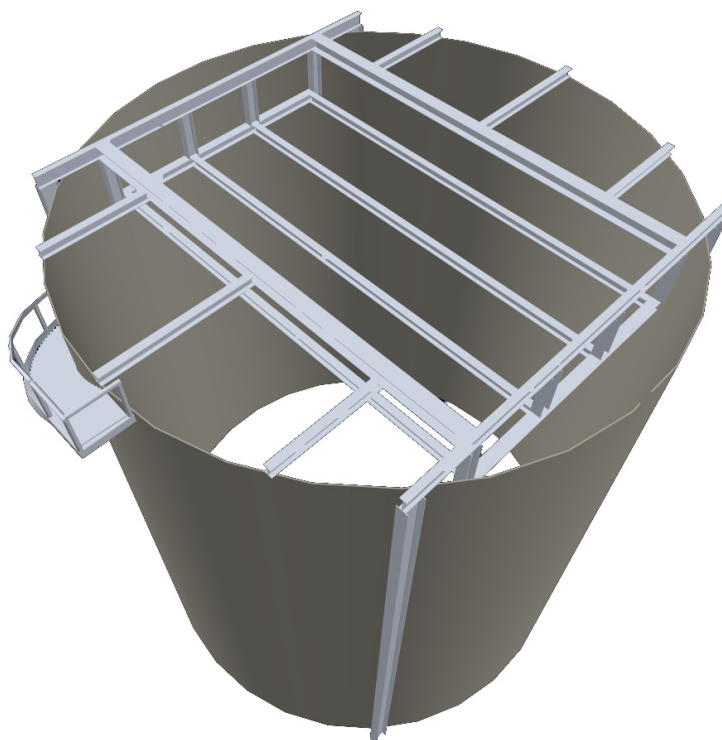
Voor het overzicht is een kolom *relatief* toegevoegd met de procentuele afwijking ten opzichte van de gemiddelde prijs. Hieruit blijkt dat variant 8 het goedkoopst is, en variant 3 het duurst.

Variant	Kosten ondersteuningsconstructie	Kosten dak	Kosten reactorwand	totale kosten	relatief
2	€ 42.138	€ 13.329	€ 470.541	€ 526.008	1,7%
3	€ 27.932	€ 13.329	€ 494.217	€ 535.478	3,5%
5	€ 16.089	€ 13.329	€ 494.217	€ 523.635	1,2%
6	€ 28.474	€ 13.329	€ 470.541	€ 512.344	-0,9%
7	€ 21.393	€ 13.329	€ 470.541	€ 505.263	-2,3%
8	€ 16.329	€ 13.329	€ 470.541	€ 500.199	-3,3%

gemiddelde kosten € 517.154

Berekend op basis van kiloprijzen:

staal	1 euro per kilo
rvs	8 euro per kilo



Figuur 5.7 - Variant 8

6. Conclusie

Uit dit ontwerp kan geconcludeerd worden dat van de vier onderzochte mogelijkheden voor de dakconstructie de sandwichplaat erg gunstig is. De doorbuiging is gering en het schuim tussen de dakplaten kan bij lage temperaturen ook als isolatie dienen. De ondersteuning van de dakplaten aan de buitenkant heeft het voordeel dat deze liggers niet van rvs gemaakt hoeven te worden.

Uit de uitwerking van de verschillende ondersteuningsconstructies blijkt dat de varianten met de kolommen buiten de tank het goedkoopst zijn. De achtste variant, met de extra hangers, is het goedkoopst met de toegepaste uitgangspunten. De varianten met het steunen op de reactorwand en de varianten met de kolommen in de reactor zijn een stuk duurder. Wel moet hierbij rekening gehouden worden dat de reactorwand bij alle varianten het grootste deel van de prijs bepaalt. De dak- en ondersteuningsconstructie bepaalt bij de meeste varianten nog geen 10% van de totale kosten.

Hieronder volgt nog een controle van het Programma van Eisen. Schuingedrukt staat in hoeverre er rekening is gehouden met de betreffende eisen.

ALGEMEEN

- 1.1 Een lage kostprijs (berekening door middel van kiloprijzen) is belangrijk.
De hele berekening is op deze eis gebaseerd.
- 1.2 Er moet rekening gehouden worden met de uitvoeringsaspecten.
Er is beperkt gekeken naar de uitvoeringsaspecten van de dakconstructie en de reactor.
- 1.3 De bioreactor heeft een ontwerplevensduur van minimaal 10 jaar.
Hier is verder geen controle op uitgevoerd.

NORMEN

- 2.1 Waar mogelijk moet voldaan worden aan de Amerikaanse norm API 650.
Aangezien deze norm niet beschikbaar was, is niet bekend of ook aan deze eis wordt voldaan.
- 2.2 Verder moet de constructie voldoen aan de Nederlandse NEN-normen of Eurocode.
*Aan deze eis is deels voldaan doormiddel van de toetsingen van de constructie-onderdelen.
Aangezien de normen nogal uitgebreid zijn, is het niet mogelijk om te controleren of het ontwerp voldoet aan alle normen.*

BELASTINGEN

De constructie moet de volgende belastingen kunnen opnemen:

- 3.1 Windzuiging op het dak.
- 3.2 Sneeuw op het dak (volgens de Nederlandse normen).
- 3.3 Onderdruk in de bioreactor tijdens het leeglopen.
- 3.4 Overdruk in de bioreactor tijdens het zuiveringsproces, waarbij biogas wordt geproduceerd.
- 3.5 Het gewicht van de settlers.
- 3.6 Personen en materialen op het dak.

Deze belastingen vormen het uitgangspunt van de berekeningen. Hier is dus aan voldaan.

MATERIALEN

- 4.1 In de bioreactor moet rvs toegepast worden wegens het corrosieve milieu.
Aan deze eis is voldaan door de profielen die zich in de reactor bevinden uit te voeren in rvs.
- 4.2 De reactorwand en de binnenkant van de dakconstructie moeten in rvs uitgevoerd worden.
Aan deze eis is voldaan.
- 4.3 Van het rvs wordt de variant 316L gebruikt.
Aan deze eis is voldaan door de Elastiteits-modulus en de vloeispanning van deze staalsoort te gebruiken in de berekeningen.
- 4.4 Van het (constructie-) staal wordt de variant S235 gebruikt.
Aan deze eis is voldaan door de Elastiteits-modulus en de vloeispanning van deze staalsoort te gebruiken in de berekeningen.

SETTLERS

- 5.1 Deze zijn zelfdragend, ondersteuning op de 4 hoekpunten is voldoende. Voor een waterdichte afsluiting is het wel noodzakelijk dat de settlers over de gehele omtrek op een staalprofiel steunen.
Aan deze eis is voldaan door het raamwerk van staalprofielen waar de settlers in hangen.
- 5.2 Er zijn 3 settlers aanwezig in de reactor.
Aan deze eis is door het ontwerp voldaan.
- 5.3 De settlers moeten voor personen via het dak bereikbaar zijn i.v.m. onderhoud.
Aan deze eis is voldaan door de dakconstructie zo te ontwerpen dat de settlers toegankelijk zijn. Bij de dakbelasting is ook rekening gehouden met belasting door personen en materialen.
- 5.4 De settlers moeten waterpas blijven.
Aan deze eis is voldaan door de constructie symmetrisch te houden. Zolang de fundering geen ongelijke zakking vertoont zullen de settlers dit ook niet doen.

BIOREACTOR

- 6.1 De bioreactor moet gasdicht zijn.
Bij het ontwerp van de dakconstructie is hier rekening mee gehouden.
- 6.2 Het dak moet een afschot voor regenwater hebben.
Met deze eis is in het ontwerp geen rekening gehouden. Het is een aanbeveling hier nog wel naar te kijken.
- 6.3 Rondom de bioreactor moet een trap geplaatst kunnen worden.
Er is in het ontwerp niet specifiek naar gekeken, maar ondanks de aanwezigheid van kolommen aan de buitenkant van de bioreactor is het mogelijk hier een trap te bevestigen.

7. Aanbevelingen

Aanbevelingen voor verder onderzoek:

- Er kunnen eventueel andere (sterkere) rvs en staal soorten toegepast worden, zodat er slankere profielen toegepast kunnen worden.
- Met behulp van een eindige-elementen programma kan exacter bepaald worden wat de invloed van de puntlast op de reactorwand is.
- De sandwichplaat zou verder geoptimaliseerd kunnen worden voor de toepassing bij de bioreactor.
- De rvs-profielen zijn nu gekozen uit standaard profielen. Als deze profielen gelast worden uit rvs-platen kan er gekeken worden of andere afmetingen gunstiger zijn.
- Bij grotere overspanningen door de sandwichplaten zijn sommige dakliggers misschien niet meer nodig.
- Voor de kolommen in de reactor kan nog gekeken worden naar ronde of vierkante kokerprofielen, omdat deze geen zwakke as hebben.
- De aansluitingen tussen de profielen kunnen uitgewerkt worden.
- Het dakontwerp kan verder uitgewerkt worden inclusief afschot voor regenwater.
- De verticale dakplaten die de dakliggers en de ondersteuningsconstructie van de settlers verbinden kunnen ervoor zorgen dat deze liggers gaan samenwerken (als een soort vakwerk). Waarschijnlijk kunnen beide profielen hierdoor slanker gedimensioneerd worden.

De reactorwand kost vele malen meer dan de dak- en ondersteuningsconstructie. Daarom is het belangrijk om van te voren in te schatten of het uitwerken van sommige aanbevelingen zinvol is.

8. Literatuurlijst

Hieronder staat een opsomming van de gebruikte literatuur.

- Boek Toegepaste Mechanica Deel 2 (door C. Hartsuijker, 2003)
- Boek Mechanica van Constructies - Elastostatica van slanke structuren (door A.L. Bouma, 2000)
- Boek Overspannend Staal - Basisboek 1 (door *Bouwen met staal*, 2004)
- Dictaat Constructieleer 2B - Deel staalconstructies (door R. Abspoel en F.S.K. Bijlaard, maart 2005)
- Dictaat Constructieleer 3A - Dictaat deel I (door A. Romijn, september 2005)
- Infomap constructieleer (door L.A.G. Wagemans, september 2004)
- NEN 6770 (Staalconstructies, mei 1997)
- NEN 10088-4 (Roestvaste Staalsoorten, december 2005)
- Bachelor Eindwerk "Ontwerp Bezinktanks voor Biothane Systems (door S. Kuipers, juni 2005)

Bijlagen

A. Werkplan	35
B. Excel berekeningen	37
1. Opzet van de berekeningen	38
2. Parameters	39
3. Belastingen	40
4. Wanddikte reactor	41
5. Dak	44
6. Variant 2	48
7. Variant 3	58
8. Variant 5	61
9. Variant 6	63
10. Variant 7	64
11. Variant 8	67
12. Overzicht	70
13. HE Profielen	71
14. IPE profielen	72
C. Handberekeningen doorbuiging liggers	73
D. Tekening overzicht alternatieven	79

A. Werkplan

Week	Activiteit	Omschrijving
1	Inlezen en startnotitie	Contact met Biothane om duidelijkheid te krijgen over de opdracht. Informatie inwinnen over de ontwerpeisen. Schrijven van de startnotitie.
2	Conceptvorming	Bespreken startnotitie. Opstellen varianten.
3	Conceptvorming	Uitwerken van varianten.
4	Conceptvorming	Uitwerken van varianten, keuze uit de alternatieven. Maken van de tussenrapportage, tussenpeiling en maken van besprekingsverslag.
5	Uitwerking	Verder uitwerken van gekozen variant.
6	Uitwerking	Verder uitwerken van gekozen variant.
7	Afronding	Afronden uitwerking, eindrapportage (18 okt.) en eindpresentatie maken. Schrijven zelfevaluatie
8	Presentaties	Eindpresentatie op Civiel (23/24 okt.) Eindpresentatie bij Biothane

B. Excel berekeningen

1. Opzet van de berekeningen	38
2. Parameters	39
3. Belastingen	40
4. Wanddikte reactor	41
5. Dak	44
6. Variant 2	48
7. Variant 3	58
8. Variant 5	61
9. Variant 6	63
10. Variant 7	64
11. Variant 8	67
12. Overzicht	70
13. HE Profielen	71
14. IPE profielen	72

Opzet van de berekeningen

Liggers

Van de liggers wordt eerst de belasting erop bepaald, hierbij wordt door iteratieve berekening ook het eigen gewicht meegenomen.

Daarna wordt uit de belasting het maximale moment bepaald. Met dit moment kan het benodigde weerstandsmoment bepaald worden. Hier zit is sommige gevallen ook de kipfactor in de berekening.

In de tabellen IPE profielen en HE profielen wordt aan de hand van het benodigde weerstandsmoment een geschikt profiel gekozen. Deze twee profielen worden vergeleken op het eigen gewicht, en het profiel met het laagste eigen gewicht wordt gekozen.

Nadat het profiel gekozen is worden er toetsingen uitgevoerd op

- doorbuiging
- dwarskracht
- moment
- eventueel kip

Deze toetsingen (unity-checks) hebben een groene achtergrond als het resultaat kleiner of gelijk is aan 1. Anders voldoet het profiel niet, en is de achtergrond rood.

Kolommen

Bij op druk belaste kolommen wordt de drukkracht en de kniklengte bepaald. Hierna wordt gekeken wat het benodigde oppervlak is. Het gekozen profiel heeft een traagheidsstraal, welke voor de berekening meegenomen wordt door een iteratieve berekening.

Nadat de sterke as gecontroleerd is, wordt dezelfde berekening uitgevoerd voor de zwakke as (indien aanwezig).

Bij op trek belaste kolommen wordt het benodigde oppervlakte bepaald, en daarbij wordt dan het profiel gekozen.

Grijze vakjes zijn voor invoer-parameters
Groene / rode vakjes zijn toetsingen
Gele vakjes zijn de keuzes die gemaakt zijn

Standaard reken-parameters

Diameter reactor	15,0	m	$\frac{1}{4} * \pi * d^2$
Oppervlakte reactor	176,7	m ²	
Aantal settlers	3	stuks	
Lengte settler	11,82	m	
Breedte settler	2,1	m	
Oppervlakte settler	24,8	m ²	
Oppervlakte dak	102,2	m ²	
Waterhoogte	17,5	m	
Reactorhoogte	18	m	
dichtheid water	1000	kg/m ³	
hoogte verticale wanden	1,3	m	
Gewicht staal	7850	kg/m ³	
max RVS spanning	145	N/mm ²	
max staalspanning	235	N/mm ²	
e-modulus RVS	200000	N/mm ²	
e-modulus staal	210000	N/mm ²	
zwaartekrachtversnelling	9,81	kg * m/s ²	
maximale doorbuiging	0,004	* lengte	
kosten RVS	€ 8	per kg	
kosten staal	€ 1	per kg	
positieve belasting en zakking werken naar beneden			
negatieve belasting en zakking werken omhoog			

Belastingen

	Belastingen	Grootheid	Eenheid
1	Windzuiging op het dak	-0,86	kN/m ²
2	Sneeuw op het dak	0,56	kN/m ²
3	Onderdruk in de reactor	0,5	kN/m ²
4	Overdruk in de reactor	-5	kN/m ²
5	Gewicht settlers	100	kN
6	Personen en materialen op het dak	1	kN/m ²

Zie randvoorwaarden

Variabele belasting neerwaarts
Variabele belasting opwaarts
Permanente belasting dakplaten

2,06 kN/m²

-5,86 kN/m²

0,28 kN/m²

sneeuw + onderdruk +
personen en materialen

overdruk + windzuiging

massa sandwichplaten

Belastingsgeval 1

Belasting op het dak (UGT)

3,43 kN/m²

Belasting op het dak (BGT)

2,34 kN/m²

1,5 * var.bel.neerw + 1,2
* eg dakplaten

Belastingsgeval 2

Belasting op het dak (UGT)

-8,54 kN/m²

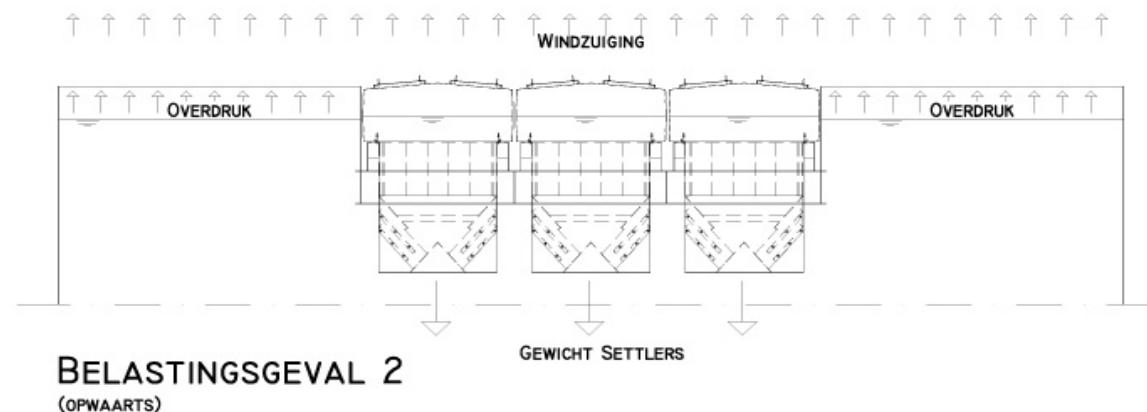
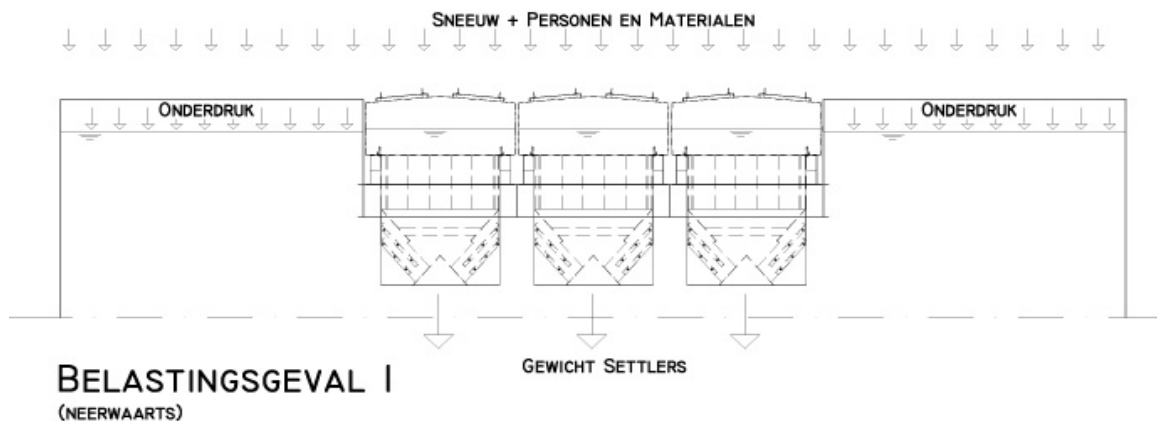
Belasting op het dak (BGT)

-5,58 kN/m²

1,5 * var.bel.opw. +
0,9 * eg dakplaten

UGT = Uiterste grens toestand = sterkteberekeningen

BGT = Bruikbaarheids grens toestand = stijfheidsberekeningen



Wanddikte zonder puntlast

vloeistofhoogte 17,5 m
 dichtheid 1000 kg/m³

diameter 15 m
 minimale wanddikte 5 mm

H_c = afstand tussen het hoogst bereikbare niveau
 opslagmedium en de onderrand van de stalen wandplaat

corrosietoeslag 1 mm
 reactordruk 50 mbar
 test reactordruk 55 mbar
 max. spanning RVS 145 N/mm²
 S = toelaatbare spanning bodemplaat
 S ≤ 0,67 * spanning RVS 97,15 N/mm²
 St ≤ 0,75 * spanning RVS 108,75 N/mm²

W = soortelijke massa opslagmedium

W = 1 kg/l
 W_t = 1 kg/l

ec = wanddikte bij in gebruik zijn (*)
$$e_c = \frac{D}{20 * S} * (98 * W * (H_c - 0,3) + p) + c$$

et = wanddikte bij testen (*)
$$e_t = \frac{D}{20 * S_t} * (98 * W_t * (H_c - 0,3) + p_t)$$

Staalspanning (ketelformule) (*)
$$\sigma_H = \frac{H * \rho * g * D}{2 * t}$$

plaat = 2 m hoog

Volume = pi * diameter *
 hoogte * wanddikte [m]

plaat [-]	hoogte [m] boven mv	H _c [m]	ec [mm]	et [mm]	t [mm]	spanning [N/mm]	volume [m ³]
1	0	17,5	14,4	12,0	15	86	1,41
2	2	15,5	12,9	10,7	13	88	1,23
3	4	13,5	11,4	9,3	12	83	1,13
4	6	11,5	9,9	7,9	10	85	0,94
5	8	9,5	8,3	6,6	9	78	0,85
6	10	7,5	6,8	5,2	7	79	0,66
7	12	5,5	5,3	3,9	6	67	0,57
8	14	3,5	3,8	2,5	5	52	0,47
9	16	1,5	2,3	1,2	5	22	0,24

7,49

dichtheid staal 7850 kg/m³
 kiloprijs rvs € 8 euro/kg

massa RVS 58818 kg
 prijs rvs reactorwand € 470.541

(*) = Formules uit Dictaat CT3051A - p. 230 - Tankwand)

Wanddikte met puntlast

Kniksterkte cylinder axiaal belast:

$$n_{cr} = \frac{-1}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} * \frac{E * t^2}{a}$$

E-modulus RVS

200000 N/mm²

Straal

7500 mm

Dwarscontractie (v)

0,3

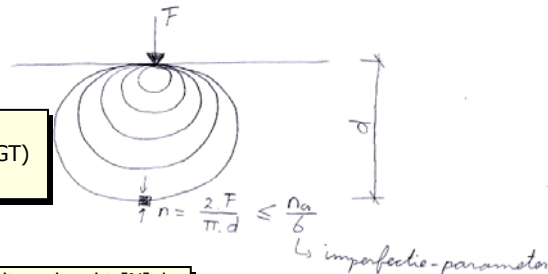
zie variant 3,
oplegreactie (UGT)
hoofdligger

Kracht

140 kN

Imperfectie/knockdown parameter

0,17



ncr * knockdownparameter

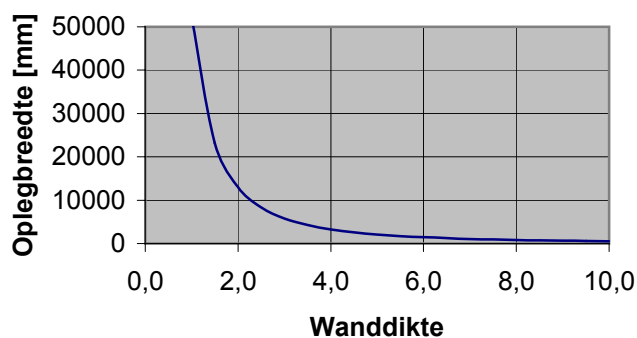
breedte = kracht [N] /
knockdownspanning

Wanddikte (t) [mm]	ncr [N/mm]	knockdown [N/mm]	oplegbreedte [mm]
1,0	-16,1	-2,7	52117
1,5	-36,3	-6,1	23163
2,0	-64,6	-10,8	13029
2,5	-100,9	-16,8	8339
3,0	-145,3	-24,2	5791
3,5	-197,7	-33,0	4254
4,0	-258,2	-43,0	3257
4,5	-326,8	-54,5	2574
5,0	-403,5	-67,2	2085
5,5	-488,2	-81,4	1723
6,0	-581,0	-96,8	1448
6,5	-681,9	-113,6	1234
7,0	-790,8	-131,8	1064
7,5	-907,8	-151,3	927
8,0	-1032,9	-172,2	814
8,5	-1166,1	-194,3	721
9,0	-1307,3	-217,9	643
9,5	-1456,6	-242,8	577
10,0	-1613,9	-269,0	521

Diepte [m]	spanning [N/mm]
0,1	892
0,2	446
0,3	297
0,4	223
0,5	178
0,6	149
0,7	127
0,8	112
0,9	99
1,0	89
1,1	81
1,2	74
1,3	69
1,4	64
1,5	59
1,6	56
1,7	52
1,8	50
1,9	47
2,0	45

Conclusie:

bij een wanddikte van 7 mm kan er maximaal een spanning optreden van 132 N/mm. De puntlast van 140 kN moet daarvoor worden uitgespreid over een breedte van ruim 1 meter en een diepte van 0,7 meter, om de maximale spanning niet te overschrijden.



Overzicht wanddikte

plaat [-]	hoogte onderkant [m]	Hc [m]	ec [mm]	et [mm]	t [mm]	spanning [N/mm]	volume [m ³]
1	0	17,5	14,4	12,0	15	86	1,41
2	2	15,5	12,9	10,7	13	88	1,23
3	4	13,5	11,4	9,3	12	83	1,13
4	6	11,5	9,9	7,9	10	85	0,94
5	8	9,5	8,3	6,6	9	78	0,85
6	10	7,5	6,8	5,2	7	79	0,66
7	12	5,5	5,3	3,9	7	58	0,66
8	14	3,5	3,8	2,5	7	37	0,66
9	16	1,5	2,3	1,2	7	16	0,33
							7,87

dichtheid staal

7850 kg/m³

kiloprijs rvs

€ 8 euro/kg

massa rvs

61777 kg

prijs rvs reactorwand

€ 494.217

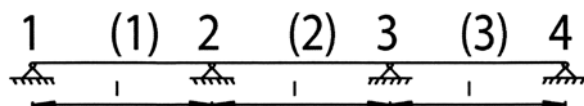
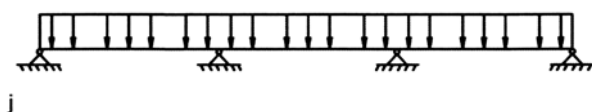
volume [m³] * dichtheid

Dak Optie 1

Enkel RVS plaat

Berekening volgens ligger op meerdere steunpunten

h.o.h. dwarsliggers	1000 mm	
breedte	1000 mm	
belasting UGT	-8,54 kN/m	
belasting BGT	-5,58 kN/m	
max RVS spanning	145 N/mm ²	
e-modulus RVS	200000 N/mm ²	
moment	8,54E+05 Nmm	$M = 1/10 * q * l^2$ maximaal boven steunpunt (punt 2 en punt 3)
weerstandmoment	5,89E+03 mm ³	$W = M / \sigma$
benodigde dikte	5,9 mm	$W = 1/6 * b * h^2$ $h = \sqrt{6 * W/b}$
zakking	-8 mm	
w max	4 mm	$w = 1/192 * q * l^4 / EI$ zakking in midden van rand-overspanning = (1) en (3)
massa rvs	46,7 kg/m ²	$1 \text{ m}^2 * \text{dikte} * \text{soortelijk gewicht}$



Dak Optie 2

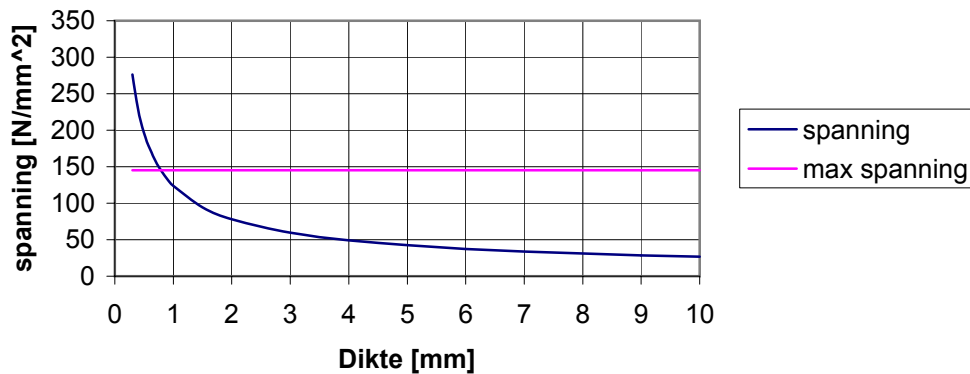
Flexibele RVS plaat als membraan

E-modulus RVS 200000 N/mm²
belasting UGT -8,54 kN/m
belasting BGT -5,58 kN/m
h.o.h. dwarsliggers 2500 mm
breedte 1000 mm
max RVS spanning 145 N/mm²

Normaalkracht
$$N = \sqrt[3]{\frac{1}{48} * EA * q^2 * l^2} \quad (\text{UGT})$$

zakking
$$w = \sqrt[3]{\frac{3}{32} * \frac{q * l^4}{EA}} \quad (\text{BGT})$$

dikte [mm] [mm]	normaalkracht [N]	spanning [N/mm ²]	zakking (BGT) [mm]	max spanning [N/mm ²]
0,3	82889	276	-70	145
0,4	91231	228	-63	145
0,5	98276	197	-59	145
0,6	104434	174	-55	145
0,7	109940	157	-53	145
0,8	114944	144	-50	145
0,9	119547	133	-48	145
1	123820	124	-47	145
1,5	141739	94	-41	145
2	156004	78	-37	145
3	178580	60	-32	145
4	196552	49	-29	145
5	211730	42	-27	145
6	224996	37	-26	145
7	236859	34	-24	145
8	247640	31	-23	145
9	257556	29	-22	145
10	266762	27	-22	145



massa rvs

6,3 kg/m²

Dak Optie 3

Geprofileerde plaat

Voor berekeningen van traagheid, zie ook handberekeningen in bijlage C

hoogte	150 mm
breedte	200 mm
dikte	1 mm
traagheid boven/onder	1125000 mm ⁴
traagheid lijf	281250 mm ⁴

$$I_{\text{steiner}} = y^2 * A$$

$$I = 1/12 * b * h^3$$

breedte	1000 mm
aantal platen boven/onder	5 keer/m
aantal platen lijf	5 keer/m
totale traagheid	7031250 mm ⁴
weerstandsmoment	93750 mm ³
belasting / m breedte UGT	-8,54 kN/m
belasting / m breedte BGT	-5,58 kN/m
w max	0,004 * l

$$W = I / (0,5 * h)$$

$$\text{spanning} = M/W$$

$$M = 1/8 * q * l^2$$

$$w = 5/384 * q * l^4 / EI$$

h.o.h. dwarsliggers [m]	M (UGT) [kNm]	spanning [N/mm ²]	w (BGT) [mm]	w max [mm]
1	1	11	-0,1	4
1,5	2	26	-0,3	6
2	4	46	-0,8	8
2,5	7	71	-2,0	10
3	10	102	-4,2	12
3,5	13	139	-7,8	14
4	17	182	-13,2	16
4,5	22	231	-21,2	18
5	27	285	-32,3	20

lengte RVS plaat	1750 mm/strekkende m
massa RVS	13,7 kg/m ²

Dak optie 4

Sandwich plaat

hoogte	100 mm
breedte	1000 mm
dikte rvs	1 mm
dikte staal	2 mm
zwaartepunt tov bovenkant	33,8 mm
y-afstand rvs	65,7 mm
y-afstand staal	32,8 mm
traagheidsmoment	6468167 mm ⁴
correctie I voor afschuiving	3234083 mm ⁴
weerstandsmoment	49250 mm ³
belasting / m breedte (UGT)	-8,54 kN/m
belasting / m breedte (BGT)	-5,58 kN/m
w max	0,004 * I
max RVS spanning	145 N/mm ²

$$I_{\text{steiner}} = y_{\text{rvs}}^2 * A_{\text{rvs}} + y_{\text{staal}}^2 * A_{\text{staal}}$$

$$0,5 * I$$

$$W[\text{rvs}] = I / (\text{afstand rvs tot normaalkrachten centrum(zwaartepunt)})$$

Zie optie 3

h.o.h. dwarsliggers [m]	M [kNm]	spanning [N/mm ²]	w (BGT) [mm]	w max [mm]
1	1	22	-0,1	4
1,5	2	49	-0,6	6
2	4	87	-1,8	8
2,5	7	135	-4,4	10
3	10	195	-9,1	12
3,5	13	265	-16,9	14
4	17	347	-28,8	16

massa RVS	7,9 kg/m ²
massa staal	15,7 kg/m ²
massa schuim	5 kg/m ²
totale belasting	0,28 kN/m ²

Verticale wanden

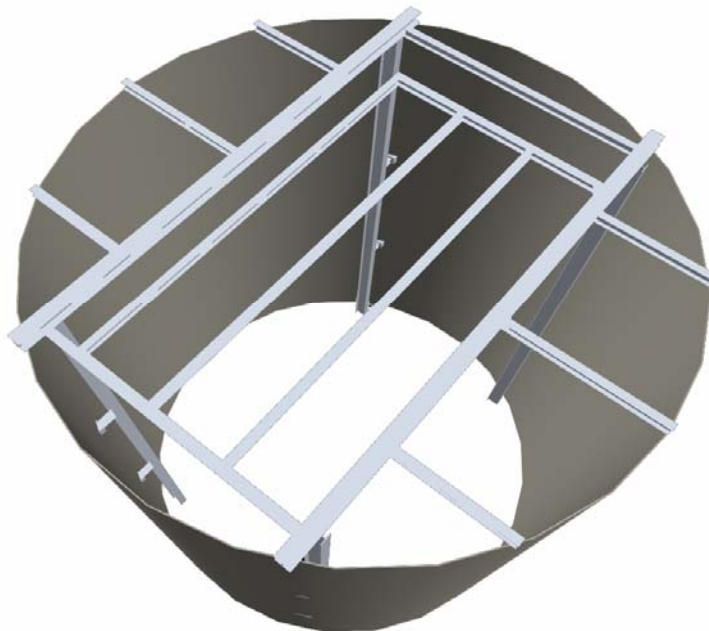
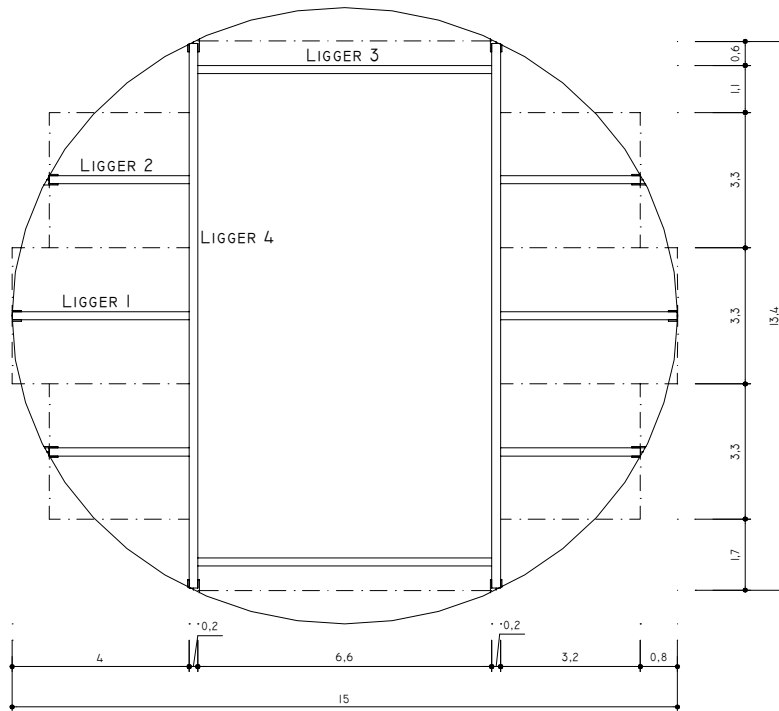
Hoogte	1,3 m
Oppervlak	48,4 m ²
oppervlak dak	102,2 m ²
totaal oppervlak dakplaten	150,6 m ²
totale massa RVS	1182 kg
totale massa staal	2365 kg
kosten schuim	1 euro/m ² /cm dikte
kosten schuim	€ 1.506
kosten RVS	€ 9.458
kosten staal	€ 2.365
totaal	€ 13.329

$$\text{hoogte} * \text{omtrek van settler raamwerk (2 * (ligger 3 + ligger 4))}$$

$$\text{opp. vert.wanden} + \text{opp. dak}$$

Variant 2

Directe ondersteuning met stabiliteit aan de reactorwand



Ligger type 1 (staal)

Lengte	4,0 m	Alleen kip-berekening bij belastings- geval 1, omdat de bovenflens niet gesteund is, en de onderflens wel			
Dragende dakbreedte	3,3 m				
q-last 1 + e.g. (BGT)	7,98 kN/m	M = 1/8 * q * l^2 W = M / sigma / kipfactor W = M / sigma			
q-last 2 + e.g. (BGT)	-18,16 kN/m				
1,5 * q-last 1 + 1,2 * e.g. (UGT)	11,61 kN/m	geselecteerd HE profiel, op basis van weerstandsmoment geselecteerd IPE profiel, op basis van weerstandsmoment			
1,5 * q-last 2 + 0,9 * e.g. (UGT)	-27,94 kN/m				
max moment 1	23,2 kNm				
max moment 2	-55,9 kNm				
Weerstandsmoment 1	189 *1000 mm3				
Weerstandsmoment 2	238 *1000 mm3				
	profiel	Wy *10^3 [mm3]	Iy *10^4 [mm4]	massa kg/m	eg [kN/m]
Optie HE profiel	HE 180 A	294	2510	35,5	0,35
Optie IPE profiel	IPE 220	252	2772	26,2	0,26

Gekozen profiel	IPE 220	252	2772	26,2	0,26
-----------------	---------	-----	------	------	------

kilogram staal	105	Gekozen profiel uit 2 bovenstaande opties. Gekozen op basis van kleinste massa massa gekozen profiel * lengte $F = 1/2 * q * l$ $w = 5/384 * q * l^4 / EI$			
Oplegreacties 1 (BGT)	16,0 kN				
Oplegreacties 2 (BGT)	-36,3 kN				
Oplegreacties 1 (UGT)	23,2 kN				
Oplegreacties 2 (UGT)	-55,9 kN				
max doorbuiging	16,0 mm				
doorbuiging (w1)	4,6 mm				
absolute doorbuiging (w2)	-10,4 mm				

hoogte gekozen profiel (h)	220 mm
flensdikte gekozen profiel (tf)	9,2 mm
lijfdikte gekozen profiel (tw)	5,9 mm
hoogte lijf = $h_w = h - 2 * t_f$	201,6 mm
breedte gekozen profiel (b)	110 mm

max dwarskracht	$V_{z;s;d}$	55,9 kN
max moment	$M_{y;s;d}$	55,9 kNm

$$V_{z;el;d} = h_w * t_w * \frac{f_{y;d}}{\sqrt{3}} = 161 \text{ kN}$$

$$M_{y;el;d} = W_{y;el} * f_{y;d} = 59,22 \text{ kNm}$$

Toetsing Dwarskracht (V) $\frac{V_{z;s;d}}{V_{z;el;d}} \leq 1$ **0,35**

Toetsing Moment (M) $\frac{M_{y;s;d}}{M_{y;el;d}} \leq 1$ **0,94**

lambda relatief $\lambda_{rel} = 1,23 * \sqrt{\frac{l * h}{b * t_f} * \frac{f_y}{E}}$

kip-factor $\frac{M_{y;s;d}}{\omega_{kip} * M_{y;el;d}} \leq 1$ **0,75**

Toetsing Kip

Zie formule knikfactor, verderop in dit verslag

Ligger type 2 (staal)

Lengte	3,2 m
Dragende dakbreedte	3,3 m
q-last 1 + e.g. (BGT)	7,94 kN/m
q-last 2 + e.g. (BGT)	-18,19 kN/m
1,5 * q-last 1 + 1,2 * e.g. (UGT)	11,57 kN/m
1,5 * q-last 2 + 0,9 * e.g. (UGT)	-27,98 kN/m
max moment 1	14,8 kNm
max moment 2	-35,8 kNm
Weerstandsmoment 1	109 *1000 mm ³
Weerstandsmoment 2	152 *1000 mm ³

voor berekeningen zie
ligger type 1

	profiel	Wy *10 ³ [mm ³]	Iy *10 ⁴ [mm ⁴]	massa kg/m	eg [kN/m]
Optie HE profiel	HE 140 A	155	1033	24,7	0,24
Optie IPE profiel	IPE 200	194	1943	22,4	0,22

Gekozen profiel	IPE 200	194	1943	22,4	0,22
-----------------	---------	-----	------	------	------

kilogram staal 72

Oplegreacties 1 (BGT)	12,7 kN
Oplegreacties 2 (BGT)	-29,1 kN
Oplegreacties 1 (UGT)	18,5 kN
Oplegreacties 2 (UGT)	-44,8 kN

max doorbuiging	12,8 mm
doorbuiging (w1)	2,7 mm
doorbuiging (w2)	-6,1 mm

hoogte gekozen profiel (h)	200 mm
flensdikte gekozen profiel (tf)	8,5 mm
lijfdikte gekozen profiel (tw)	5,6 mm
hoogte lijf = $h_w = h - 2 * t_f$	183 mm
breedte gekozen profiel (b)	100 mm

max dwarskracht $V_{z;s;d}$	44,8 kN
max moment $M_{y;s;d}$	35,8 kNm

$$V_{z;el;d} = h_w * t_w * \frac{f_{y;d}}{\sqrt{3}} = 139 \text{ kN}$$

$$M_{y;el;d} = W_{y;el} * f_{y;d} = 45,59 \text{ kNm}$$

Toetsing Dwarskracht (V) $\frac{V_{z;s;d}}{V_{z;el;d}} \leq 1$ 0,32

Toetsing Moment (M) $\frac{M_{y;s;d}}{M_{y;el;d}} \leq 1$ 0,79

lambda relatief 1,13

kip-factor 0,58

Toetsing Kip $\frac{M_{y;s;d}}{\omega_{kip} * M_{y;el;d}} \leq 1$ 0,56

Ligger type 3 (staal)

Lengte	6,6 m
Dragende dakbreedte	0,6 m
q-last verticale dakwand	0,36 kN/m
q-last 1 + e.g. (BGT)	1,99 kN/m
q-last 2 + e.g. (BGT)	-2,76 kN/m
1,5 * q-last 1 + 1,2 * e.g. (UGT)	2,76 kN/m
1,5 * q-last 2 + 0,9 * e.g. (UGT)	-4,60 kN/m
max moment 1	15,0 kNm
max moment 2	-25,0 kNm
Weerstandsmoment 1	196 *1000 mm ³
Weerstandsmoment 2	107 *1000 mm ³

voor berekeningen zie
ligger type 1

Kip is hier dus maatgevend

	profiel	Wy *10 ³ [mm ³]	Iy *10 ⁴ [mm ⁴]	massa kg/m	eg [kN/m]
Optie HE profiel	HE 160 A	220	1673	30,4	0,30
Optie IPE profiel	IPE 220	252	2772	26,2	0,26

Gekozen profiel	IPE 220	252	2772	26,2	0,26
-----------------	---------	-----	------	------	------

kilogram staal 173

Oplegreacties 1 (BGT)	6,6 kN
Oplegreacties 2 (BGT)	-9,1 kN
Oplegreacties 1 (UGT)	9,1 kN
Oplegreacties 2 (UGT)	-15,2 kN

max doorbuiging	26,4 mm
doorbuiging (w1)	8,4 mm
doorbuiging (w2)	-11,7 mm

hoogte gekozen profiel (h)	220 mm
flensdikte gekozen profiel (tf)	9,2 mm
lijfdikte gekozen profiel (tw)	5,9 mm
hoogte lijf = $h_w = h - 2 * t_f$	201,6 mm
breedte gekozen profiel (b)	110 mm

max dwarskracht $V_{z;s;d}$	15,2 kN
max moment $M_{y;s;d}$	25,0 kNm

$$V_{z;el;d} = h_w * t_w * \frac{f_{y;d}}{\sqrt{3}} = 161 \text{ kN}$$

$$M_{y;el;d} = W_{y;el} * f_{y;d} = 59,22 \text{ kNm}$$

Toetsing Dwarskracht (V) $\frac{V_{z;s;d}}{V_{z;el;d}} \leq 1$ 0,09

Toetsing Moment (M) $\frac{M_{y;s;d}}{M_{y;el;d}} \leq 1$ 0,42

lambda relatief 1,56
kip-factor 0,35
Toetsing Kip $\frac{M_{y;s;d}}{\omega_{kip} * M_{y;el;d}} \leq 1$ 0,73

Ligger type 4 (staal)

Lengte

12,0 m

Afstand van oplegging tot

Belastingen (geval 1)	kracht UGT	kracht BGT	afstand	
puntlast 1	18,5	12,7	2,7	Oplegreactie liggertype 2
puntlast 2	23,2	16,0	6	Oplegreactie liggertype 1
puntlast 3	18,5	12,7	9,3	Oplegreactie liggertype 2
q-last verticale dakplaten	0,4	0,36		

Belastingen (geval 2)	kracht UGT	kracht BGT	afstand
puntlast 1	-44,8	-29,1	2,7
puntlast 2	-55,9	-36,3	6
puntlast 3	-44,8	-29,1	9,3
q-last verticale dakplaten	0,3	0,36	

eigengewicht

Oplegreacties 1 (BGT)

Oplegreacties 2 (BGT)

Oplegreacties 1 (UGT)

Oplegreacties 2 (UGT)

0,67 kN/m

26,9 kN

-41,1 kN

38,1 kN

-67,1 kN

max moment 1

max moment 2

Weerstandsmoment 1

Weerstandsmoment 2

141,9 kNm

-271,9 kNm

604 *1000 mm³

1155 *1000 mm³

$1/2 * [(eigen\ gewicht + gewicht\ dakplaat) * lengte + som(puntlasten\ BGT)]$

$1/2 * [1,2 * (eigen\ gewicht + gewicht\ dakplaat) * lengte + som(puntlasten\ UGT)]$

max moment = moment tvg puntlasten + [moment tgv qlast] = oplegreactie tvg puntlasten * $1/2 * l - puntlast\ 1 * afstand\ tot\ midden + [1/8 * q * l^2]$
ZIE OOK VOLGENDE PAGINA (matrixframe)

$W = M / \sigma$

	profiel	Wy *10 ³ [mm ³]	Iy *10 ⁴ [mm ⁴]	massa kg/m	eg [kN/m]
Optie HE profiel	HE 300 A	1260	18260	88,3	0,87
Optie IPE profiel	IPE 400	1156	23130	67,8	0,67

Gekozen profiel	IPE 400	1156	23130	67,8	0,67
-----------------	---------	------	-------	------	------

kilogram staal

814

max doorbuiging

48 mm

doorbuigingsparameter

doorbuiging

2304

47 mm

volgt uit handberekening met hoekverdraaiingen uit opp. M/EI-lijn
Parameter = EI*w

$w = parameter/EI$

hoogte gekozen profiel (h)

400 mm

flensdikte gekozen profiel (tf)

13,5 mm

lijfdikte gekozen profiel (tw)

8,6 mm

hoogte lijf = $h_w = h - 2 * t_f$

373 mm

max dwarskracht

$V_{z;s;d}$

67,1 kN

max moment

$M_{y;s;d}$

271,9 kNm

$V_{z;el;d} = h_w * t_w * \frac{f_{y;d}}{\sqrt{3}} A_{y;s;d}$

435 kN

$M_{y;el;d} = W_{y;el} * f_{y;d}$

272 kNm

Toetsing Dwarskracht (V)

0,15

$\frac{V_{z;s;d}}{V_{z;el;d}} \leq 1$

Toetsing Moment (M)

1,00

$\frac{M_{y;s;d}}{M_{y;el;d}} \leq 1$

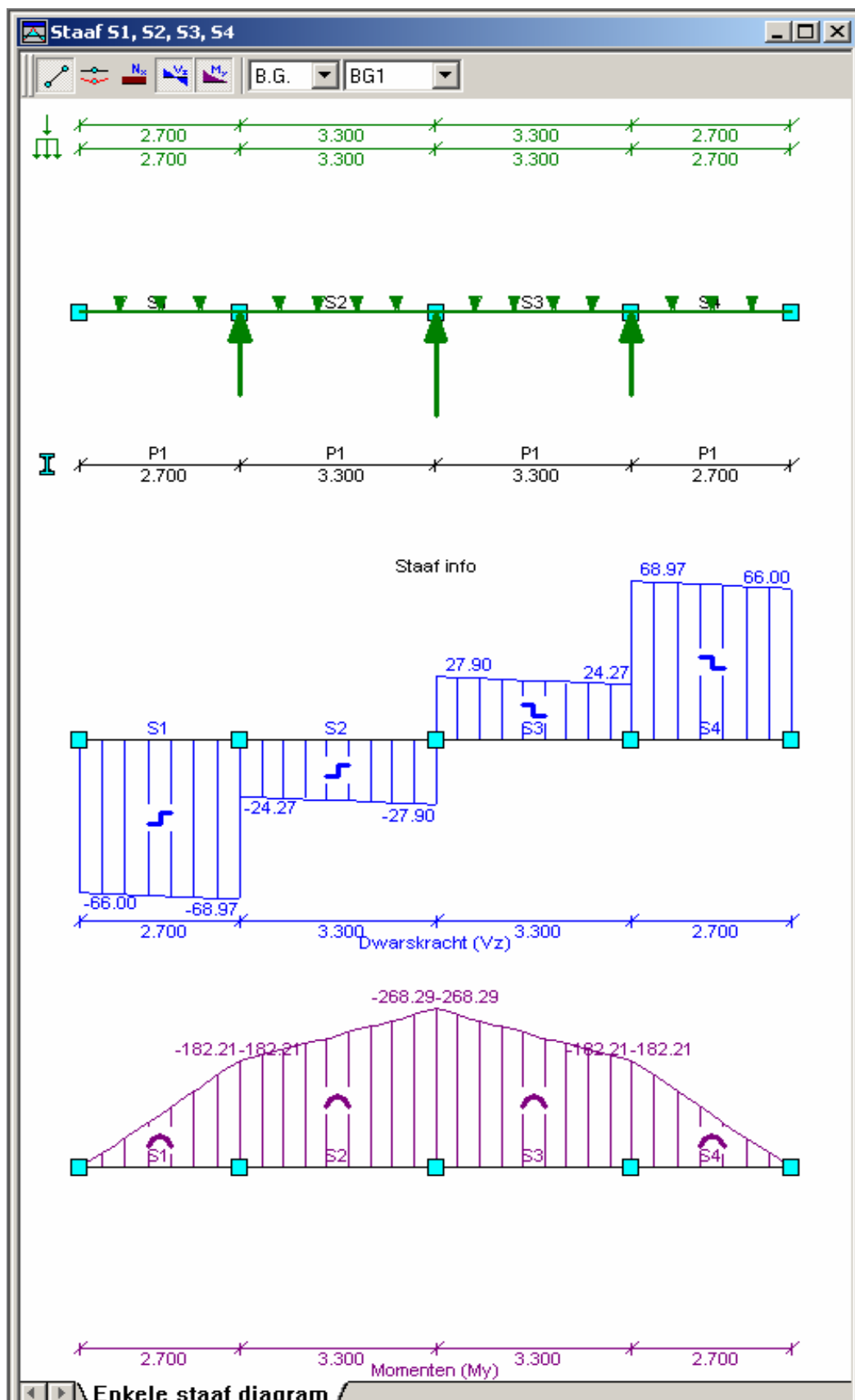
Toetsing kip niet nodig omdat de ligger op een aantal plekken zijwaarts gesteund wordt.

Matrixframe

Controle berekening

Ligger 4

Belastingsgeval 2



Kolommen (RVS)

Lengte

18 m

Belastingsgeval 1

Belasting op top

33,4 kN

Belasting van settlers

136,1 kN

max drukkracht

169,5 kN

Oplegreactie ligger 4

Oplegreactie ondersteuning settlers

Belastingsgeval 2 is niet maatgevend

lengte - hoogte verticale dakplaten

veronderstel scharnierend bevestigd aan de bodem, en scharnierend ter plaatse van bevestiging settlers

Knik op sterke as

systeemplengte

16,7 m

kniklengte

16,7 m

traagheidsstraal y

77 mm

deze waarde moet kleiner zijn dan de traagheidsstraal van het gekozen profiel. Dit moet handmatig ingevoerd worden, omdat dit niet naar een goed resultaat itereerd.

knikcurve

b

alpha k

0,34

lambda0

0,2

lambda

216,9

specifieke slankheid

116,7

relatieve slankheid

1,86

bepalen knikfactor

breuk

0,73

wortel

3,37

knikfactor

0,24

Dictaat CT2051B staal, pagina 60

lambda = kniklengte / traagheidsstraal

spec. Slankheid = $\pi * \sqrt{E/RV\text{spanning}}$

rel. slankheid = lambda / spec. slankheid

bepaald met formule uit NEN6770 (zie op volgende pagina)

oppervlak = drukkracht / (staalspanning * knikfactor)

benodigd oppervlak

4905 mm²

	profiel	oppervlak [mm]	traagheidsstraal y [mm]	traagheidsstraal x [mm]	massa [kg/m]	eg [kN/m]
Optie HE profiel	HE 200 A	5380	82,8	49,8	42,3	0,41
Optie IPE profiel	IPE 300	5380	125	33,5	42,2	0,41

Gekozen profiel HE 200 A 5380 82,8 49,8 42,3

Controle Knik om de zwakke as

systeemplengte

16,7 m

kniklengte

8,4 m

traagheidsstraal x

49,8 mm

1/2 van systeemplengte, omdat kolom halverwege extra ondersteund wordt door de tankwand.

knikcurve

c

alpha k

0,49

lambda0

0,2

lambda

167,7

specifieke slankheid

116,7

relatieve slankheid

1,44

bepalen knikfactor

breuk

0,89

wortel

2,28

knikfactor (omega_buc)

0,34

Hier is toch het HE profiel gekozen (ondanks dat het IPE profiel lichter is), omdat het verschil in gewicht met het IPE-profiel erg gering is en er bij een IPE profiel een extra steun naar de tankwand bijkomt, omdat knik om de zwakke as anders niet voldoet. Er zou nog gekeken kunnen worden naar andere profielen (ronde of rechthoekige koker liggers), die geen zwakke as hebben en dus niet afgesteund hoeven te worden op de tankwand.

benodigd oppervlak

3481 mm²

kilogram staal

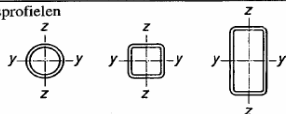
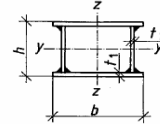
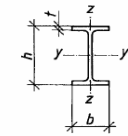
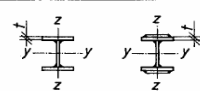
761 kg

Toetsing Knik

0,91

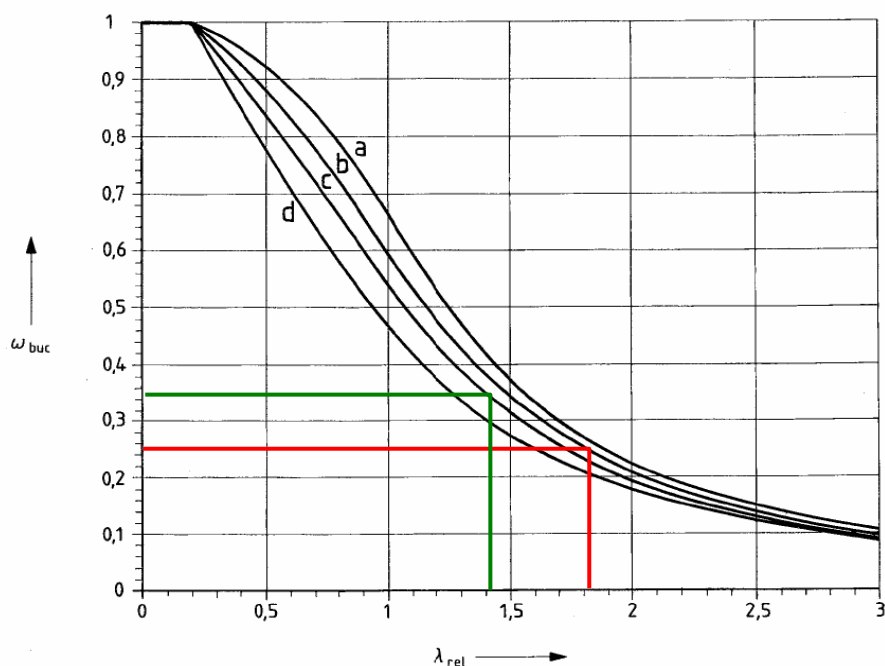
$$\frac{N_{c;s;d}}{\omega_{buc} * N_{c;el;d}} \leq 1$$

Kniktabellen

doorsnedeform		instabiliteit om de as	instabiliteitskromme
buisprofielen 	warmgewalst	elke as	a
	koudgevormd met $f_{y,d}^{*})$	elke as	b
	koudgevormd met $f_{y,m,d}^{*})$	elke as	c
gelaste kokerprofielen 	algemeen (behalve in het hierna gegeven geval)	elke as	b
	zware lassen en $b/t_1 < 30$ $h/t_2 < 30$	y-y z-z	c c
gewalste I-profielen 	$h/b > 1,2$; $t \leq 40$ mm	y-y z-z	a b
	$h/b > 1,2$; $40 < t \leq 80$ mm en $h/b \leq 1,2$; $t \leq 80$ mm	y-y z-z	b c
	$t > 80$ mm	y-y z-z	d d
gelaste I-profielen 	$t \leq 40$ mm	y-y z-z	b c
	$t > 40$ mm	y-y z-z	c d
U-, L-, T-profielen en massieve profielen 		elke as	c
Overige doorsnedeformaten moeten zo goed mogelijk worden ingepast			

	Instabiliteitskromme			
	a	b	c	d
α_k	0,21	0,34	0,49	0,76
λ_o	0,2	0,2	0,2	0,2

$$\omega_{buc} = \frac{\sigma_{buc;d}}{f_{y;d}} = \frac{1 + \alpha_k (\lambda_{rel} - \lambda_o) + \lambda_{rel}^2}{2 \lambda_{rel}^2} - \frac{1}{2 \lambda_{rel}^2} \sqrt{\{1 + \alpha_k (\lambda_{rel} - \lambda_o) + \lambda_{rel}^2\}^2 - 4 \lambda_{rel}^2}$$



Ondersteuning Settlers (RVS)

Lengte

6,6 m

$\frac{1}{4} * [1,2 * \text{gewicht settler} + 1,5 * (\text{sneeuw_belasting} + \text{personen en materialen}) * \text{opp. settler}]$

Belastingen (geval 1)	kracht [UGT]	kracht [BGT]	afstand
puntlast 1	44,5	34,7	0
puntlast 2	89,0	69,4	2,2
puntlast 3	89,0	69,4	4,4
puntlast 4	44,5	34,7	6,6

$\frac{1}{4} * [\text{gewicht settler} + (\text{sneeuw_belasting} + \text{personen en materialen}) * \text{opp. settler}]$

Afstand van oplegging tot puntlast

Belastingsgeval 2 levert geen opwaartse belasting op, dus is niet maatgevend

eigengewicht

0,76 kN/m

$0,5 * [\text{SOM}(\text{puntlasten}) + \text{eigengewicht} * \text{lengte}]$

Oplegreacties 1 [UGT]

136,1 kN

Oplegreacties 1 [BGT]

106,6 kN

$0,5 * [\text{SOM}(\text{puntlasten}) + \text{eigengewicht} * \text{lengte}]$

max moment 1

200,0 kNm

$\text{puntlast 2} * \text{afstand} + \frac{1}{8} * q * l^2$

Weerstandsmoment 1

1380 * 1000 mm³

$W = M / \sigma$

	profiel	Wy * 10 ³ [mm ³]	Iy * 10 ⁴ [mm ⁴]	massa [kg/m]	eg [kN/m]
Optie HE profiel	HE 320 A	1479	22930	97,6	0,96
Optie IPE profiel	IPE 450	1500	33740	77,6	0,76

Gekozen profiel IPE 450 1500 33740 77,6 0,76

kilogram staal

512

max doorbuiging
doorbuigingsparameter

26,4 mm
707 (BGT)

volgt uit handberekening
met hoekverdraaiingen uit
opp. M/EI-lijn
Parameter = EI*w

doorbuiging [BGT] 10,0 mm

hoogte gekozen IPE profiel (h) 450 mm

flensdikte gekozen IPE profiel (t_f) 14,6 mm

lijfdikte gekozen IPE profiel (t_w) 9,4 mm

hoogte lijf = $h_w = h - 2 * t_f$ 420,8 mm

max dwarskracht $V_{z;s;d}$ 106,6 kN

max moment $M_{y;s;d}$ 200,0 kNm

$$V_{z;el;d} = h_w * t_w * \frac{f_{y;d}}{\sqrt{3}}$$

$$M_{y;el;d} = W_{y;el} * f_{y;d}$$

331 kN
217,5 kNm

Toetsing Dwarskracht (V)

0,32

$$\frac{V_{z;s;d}}{V_{z;el;d}} \leq 1$$

Toetsing Moment (M)

0,92

$$\frac{M_{y;s;d}}{M_{y;el;d}} \leq 1$$

Geen toetsing op kip omdat deze liggers op meerdere plekken worden gesteund door de dwarsondersteuning van de settlers en door de settlers zelf

Dwarsondersteuning settlers

lengte 11,9 m
 profiel IPE 180
 massa 18,8 kg/m

kilogram staal 224

q-last eigen gewicht [BGT] 0,18 kN/m
 traagheidsmoment (I_y) 1317 mm⁴
 zakking 17 mm
 w max 20 mm

Voor waterdichte aansluiting op settlers is gekozen voor max 20 mm
 ipv $1/250 * l = 47,6$

Uitvoer

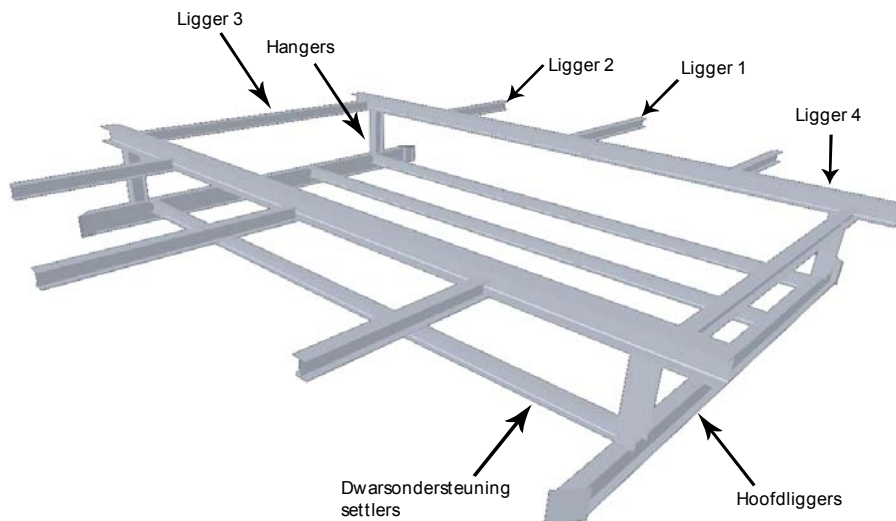
Onderdeel	aantal	Type	Profiel	Gewicht	Prijs
Ligger 1	2	staal	IPE 220	105	€ 210
Ligger 2	4	staal	IPE 200	72	€ 287
Ligger 3	2	staal	IPE 220	173	€ 346
Ligger 4	2	staal	IPE 400	814	€ 1.627
Kolommen	4	rvs	HE 200 A	761	€ 24.365
Ondersteuning settlers	2	rvs	IPE 450	512	€ 8.195
Dwarsondersteuning settlers	4	rvs	IPE 180	224	€ 7.159
					€ 42.188

kilo's staal 2469
 kilo's RVS 4965

staal 1 euro/kg
 rvs 8 euro/kg

Variant 3

Ondersteuning op de reactorwand



De dakconstructie is identiek aan variant 2
De hoofdliggers steunen nu direct op de reactorwand

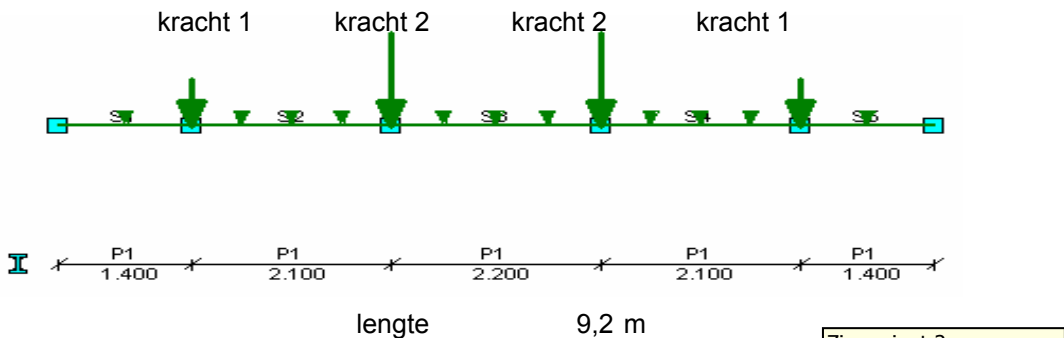
Hangers

De hangers zijn een verbinding tussen de hoofdliggers en liggers 4, om een luchtdichte afsluiting tussen de dakplaten te krijgen. Daarom kan er een zo licht mogelijk profiel gekozen worden.

lengte	1,3 m
profiel	IPE 100
massa	8,1 kg/m
massa RVS	11 kg

Voor de aansluiting met de dakplaten zou eventueel ook gekozen kunnen worden voor een ander profiel, bijvoorbeeld een UNP profiel.

Hoofdligger (RVS)



	BGT	UGT	
kracht 1	34,7	44,5	kN
kracht 2	69,4	89,0	kN

Zie variant 2, ondersteuning settlers

max moment UGT
Weerstandsmoment

389 kNm
2684 *1000 mm³

Zie ook matrixframe resultaat op volgende pagina

	profiel	Wy *10 ³ [mm ³]	Iy *10 ⁴ [mm ⁴]	massa kg/m	eg [kN/m]
Optie HE profiel	HE 450 A	2896	63720	139,8	1,37
Optie IPE profiel	IPE 600	3069	92080	122,4	1,20

Gekozen profiel	IPE 600	3069	92080	122,4	1,20
-----------------	---------	------	-------	-------	------

kilogram staal

1126

massa gekozen profiel * lengte

Oplegreacties 1 (BGT)

109,6 kN

Oplegreacties 1 (UGT)

140,2 kN

kracht 1 + kracht 2 +
1/2 * q-last * lengte

kracht 1[UGT] + kracht 2[UGT] +
1/2 * 1,2 * q-last * lengte

w max

doorbuigingsparameter

36,8 mm

doorbuiging

2747

14,91 mm

volgt uit handberekening
met hoekverdraaiingen uit
opp. M/EI-lijn
Parameter = EI*w_max

hoogte gekozen IPE profiel (h)

600 mm

flensdikte gekozen IPE profiel (tf)

19 mm

lijfdikte gekozen IPE profiel (tw)

12 mm

hoogte lijf = $h_w = h - 2 * t_f$

562 mm

max dwarskracht

$V_{z;s;d}$

140,2 kN

max moment

$M_{y;s;d}$

389,2 kNm

$$V_{z;el;d} = h_w * t_w * \frac{f_{y;d}}{\sqrt{3}}$$

565 kN

$$M_{y;el;d} = W_{y;el} * f_{y;d}$$

445 kNm

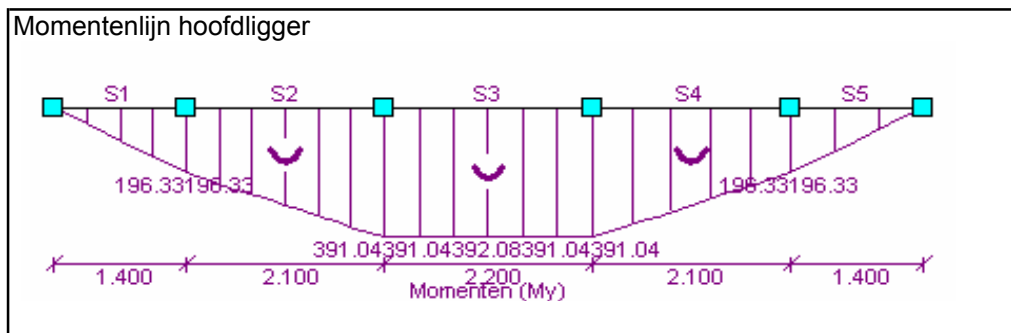
Toetsing kip niet nodig omdat de
ligger op een aantal plekken
zijwaarts gesteund wordt.

Toetsing Dwarskracht (V)

0,25 $\frac{V_{z;s;d}}{V_{z;el;d}} \leq 1$

Toetsing Moment (M)

0,87 $\frac{M_{y;s;d}}{M_{y;el;d}} \leq 1$



Overige delen

Zie variant 2

	profiel	gewicht [kg]
Ligger 1	IPE 220	105
Ligger 2	IPE 200	72
Ligger 3	IPE 220	173
Ligger 4	IPE 400	814
Dwarsondersteuning settlers	IPE 180	224

Uitvoer

Onderdeel	Aantal	Type	Profiel	Gewicht	Prijs
Ligger 1	2	staal	IPE 220	105	€ 210
Ligger 2	4	staal	IPE 200	72	€ 287
Ligger 3	2	staal	IPE 220	173	€ 346
Ligger 4	2	staal	IPE 400	814	€ 1.627
Hangers	4	rvs	IPE 100	11	€ 337
Ondersteuning settlers	4	rvs	IPE 180	224	€ 7.159
Hoofdliggers	2	rvs	IPE 600	1126	€ 18.017
					€ 27.983

kilo's staal 2469
 kilo's RVS 3189

staal 1 euro/kg
 rvs 8 euro/kg

Variant 5

Vakwerk ondersteuning op reactorwand

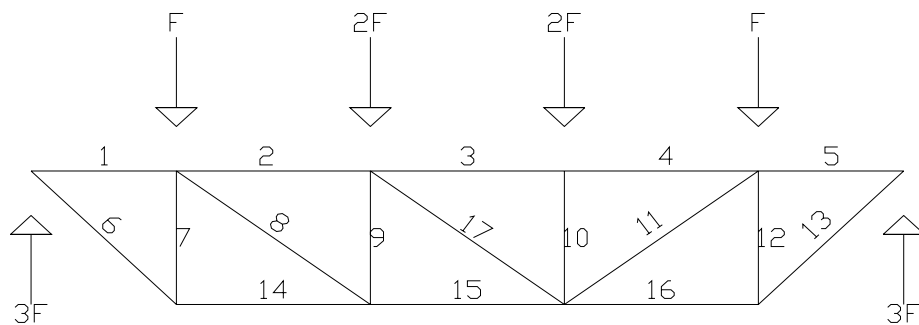
Zelfde constructie als variant 3. Alleen is de hoofdligger die de settlers ondersteund vervangen door een vakwerk.

Vakwerk

kracht F (geval 1) [UGT]
kracht F (geval 2) [UGT]

44,5 kN (maatgevend voor vakwerk)
14,5 kN

Zie variant 2,
ondersteuning settlers



Er is hier niet gekeken naar andere profielen. UNP profielen zouden bijvoorbeeld ook een optie kunnen zijn.

Staat	Kracht	Staatkracht [kN]	Lengte [m]	Oppervlak [mm ²]	Profiel
1	-3*F	-134	1,5	921	IPE
2	-16/3*F	-237	2,0	1638	IPE
3	-16/3*F	-237	2,0	1638	IPE
4	-16/3*F	-237	2,0	1638	IPE
5	-3*F	-134	1,5	921	IPE
6	+3*sqrt(2)	189	2,1	1303	IPE
7	-3*F	-134	1,5	921	IPE
8	+10/3*F	148	2,5	1023	staaf
9	-2F	-89	1,5	614	IPE
10	-2F	-89	1,5	614	IPE
11	+10/3*F	148	2,5	1023	staaf
12	-3*F	-134	1,5	921	IPE
13	+3*sqrt(2)	189	2,1	1303	IPE
14	+3*F	134	2,0	921	IPE
15	+16/3*F	237	2,0	1638	IPE
16	+3*F	134	2,0	921	IPE
17	nulstaaf	0	2,5	0	staaf

		massa kg/m	lengte
IPE Profiel	IPE 140	12,90	25,2
staafdiameter	36,1	8,03	7,5

totaal gewicht 385,9 kg

Uitvoer

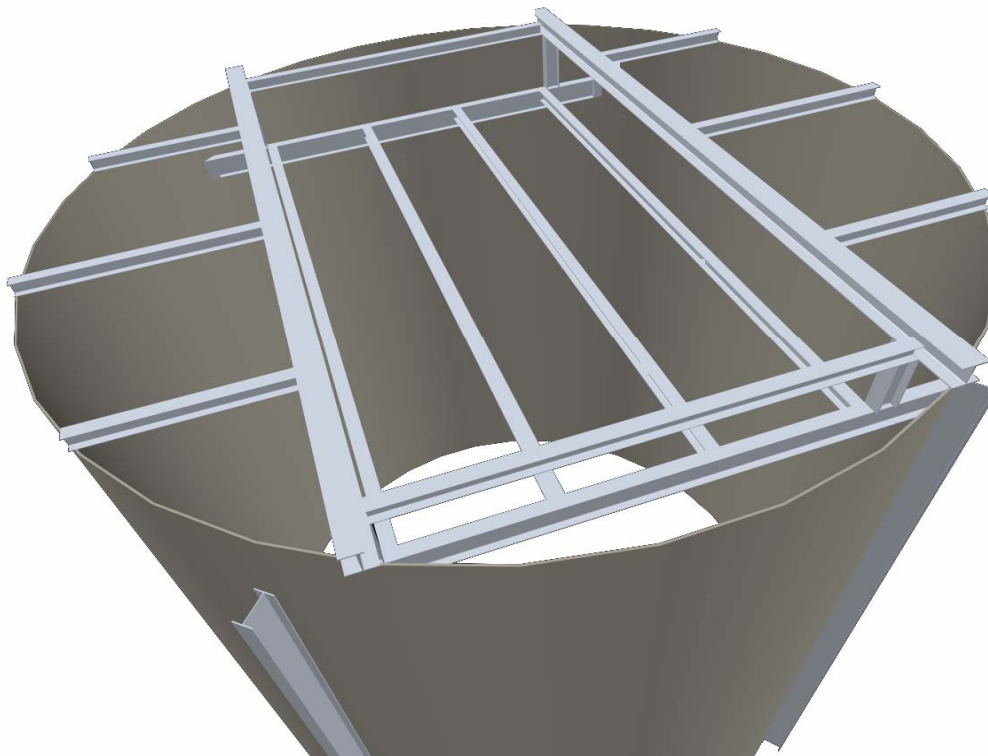
Onderdeel	Aantal	Type	Profiel	Gewicht	Prijs
Ligger 1	2	staal	IPE 220	104,8	€ 210
Ligger 2	4	staal	IPE 200	71,68	€ 287
Ligger 3	2	staal	IPE 220	172,9	€ 346
Ligger 4	2	staal	IPE 400	813,6	€ 1.627
Hangers	4	rvs	IPE 100	10,53	€ 337
Ondersteuning settlers	4	rvs	IPE 180	223,7	€ 7.159
Vakwerk	2	rvs	-	385,9	€ 6.174
					€ 16.140

kilo's staal 2469
 kilo's RVS 1709

staal 1 euro/kg
 rvs 8 euro/kg

Variant 6

Ondersteuning op verstevigde reactorwand



Anders dan bij variant 3

- Extra kolommen aan de buitenkant, hierdoor wordt de reactorwand niet belast

Kolommen

Zie variant 7

profiel IPE 100
gewicht 135 kg

Uitvoer

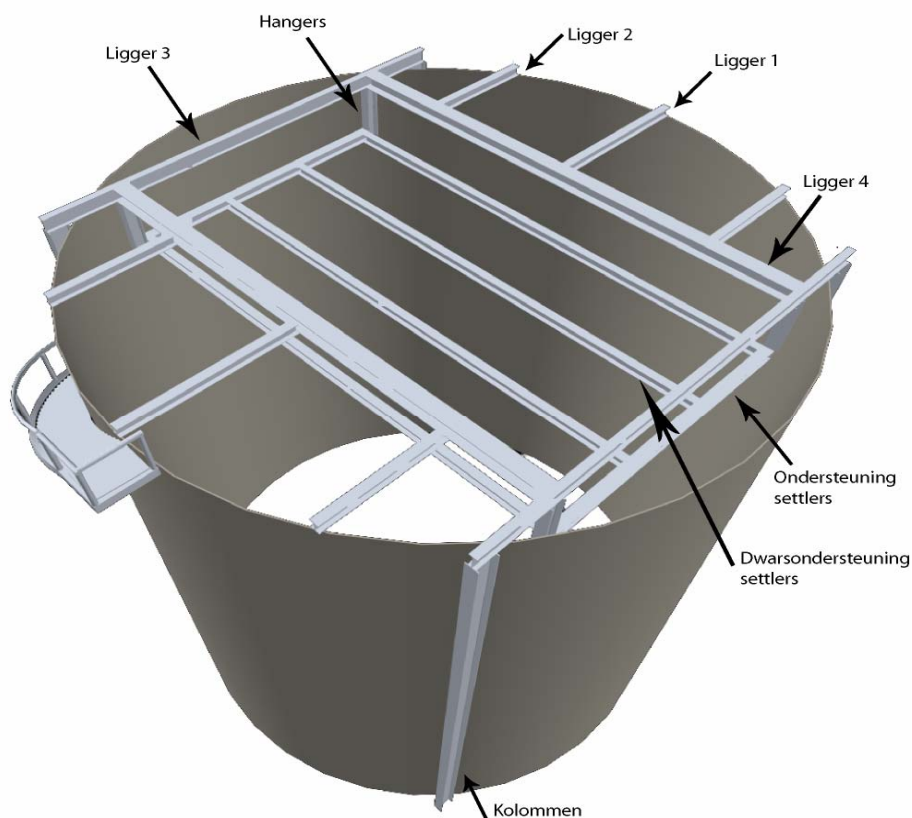
Onderdeel	Aantal	Type	Profiel	Gewicht	Prijs
Ligger 1	2	staal	IPE 220	104,8	€ 210
Ligger 2	4	staal	IPE 200	71,7	€ 287
Ligger 3	2	staal	IPE 220	172,9	€ 346
Ligger 4	2	staal	IPE 400	813,6	€ 1.627
Hangers	4	rvs	IPE 100	10,5	€ 337
Ondersteuning settlers	4	rvs	IPE 180	223,7	€ 7.159
Hoofdliggers	2	rvs	IPE 600	1126,1	€ 18.017
Kolommen	4	staal	IPE 100	135,3	€ 541
					€ 28.524

kilo's staal 3010
kilo's RVS 3189

staal 1 euro/kg
rvs 8 euro/kg

Variant 7

Ondersteuning buiten de reactor



Dwars ondersteuning settlers

Zie variant 2

profiel	IPE 180
kg staal	224 kg

Ondersteuning settlers

Zie variant 2

profiel	IPE 450
kg staal	512 kg

Oplegreacties 1 [UGT]	136 kN
Oplegreacties 1 [BGT]	107 kN

Hangers

lengte	1,5 m
kracht [UGT]	136 kN
benodigd oppervlak	938 mm ²
profiel	IPE 100
massa	8,1 kg/m
kg RVS	12 kg

Oppervlak = kracht / spanning

Een IPE 100 voldoet al, maar voor stijfheid en aansluitingen zou een zwaarder (of ander, UNP) profiel gekozen kunnen worden

Liggers 3

lengte	10 m	
afstand puntlast tot uiteinde	1,5 m	oplegreactie ligger 4 + hangers
max puntlast [BGT]	133 kN	
max puntlast [UGT]	174 kN	
q-last dak & wandplaten [BGT]	1,77 kN/m	
q-last dak & wandplaten [UGT]	2,49 kN/m	max puntlast * afstand tot uiteinde + 1/8 * q (e.g.+dak & wandplaten) * l ²
max moment [BGT]	271 kNm	
max moment [UGT]	314 kNm	

Benodigd weerstandmoment 3225 *1000 mm³

	profiel [-]	I _y *10 ⁴ [mm ⁴]	W _y *10 ³ [mm ³]	massa [kg/m]	eg [kN/m]
Optie HE profiel	HE 500 A	86970	3550	155,1	1,52
Optie IPE profiel	IPE 750 x 147	166100	4411	147,2	1,44

Gekozen profiel	IPE 750 x 147	166100	4411	147,2	1,44
-----------------	---------------	--------	------	-------	------

max doorbuiging	40 mm	volgt uit handberekening met hoekverdraaiingen uit opp. M/EI lijn
doorbuigingsparameter w midden	3291	Parameter * M = EI*w _{max}
	11 mm	som doorbuiging puntlast en doorbuiging q-last
kilogram staal	1472 kg	puntlast + 0,5 * q * l
Oplegreacties 1 (BGT)	149 kN	oplegreactie ligger 4 [ugt] + oplegreactie ondersteuning settlers [ugt] + 1,2 * 0,5 * q * l ²
Oplegreacties 1 (UGT)	195 kN	
hoogte gekozen profiel (h)	753 mm	
flensdikte gekozen profiel (tf)	17 mm	
lijfdikte gekozen profiel (tw)	13,2 mm	
hoogte lijf = $h_w = h - 2 * t_f$	719 mm	
breedte gekozen profiel (b)	265 mm	
max dwarskracht $V_{z;s;d}$	195,3 kN	
max moment $M_{y;s;d}$	314,0 kNm	
$V_{z;el;d} = h_w * t_w * \frac{f_{y;d}}{\sqrt{3}}$	1288 kN	
$M_{y;el;d} = W_{y;el} * f_{y;d}$	1037 kNm	
Toetsing Dwarskracht (V)	0,15	$\frac{V_{z;s;d}}{V_{z;el;d}} \leq 1$
Toetsing Moment (M)	0,30	$\frac{M_{y;s;d}}{M_{y;el;d}} \leq 1$
lambda relatief	1,41	$\lambda_{rel} = 1,23 * \sqrt{\frac{l * h}{b * t_f} * \frac{f_y}{E}}$
kip-factor	0,41	
Toetsing Kip	0,73	$\omega_{kip} * M_{y;el;d} \leq 1$

Liggers 1

zie variant 2
 profiel IPE 220
 gewicht 105 kg

Liggers 2

zie variant 2
 profiel IPE 200
 gewicht 72

Liggers 4

Zie variant 2

profiel	IPE 400
kg staal	814 kg

Oplegreacties 1 (BGT)	26,9 kN
Oplegreacties 2 (BGT)	-41,1 kN
Oplegreacties 1 (UGT)	38,1 kN
Oplegreacties 2 (UGT)	-67,1 kN

Kolommen

drukkracht [UGT] 195 kN oplegreactie ligger 3 [UGT]
 lengte 18 m
 oppervlak ben 1347 mm² oppervlak = kracht / spanning

Knik is niet van belang, aangezien de kolom aan de reactorwand vastgezet kan worden

Keuze profiel IPE 100
 gewicht profiel 8,1 kg/m
 gewicht kolom 146 kg

Uitvoer

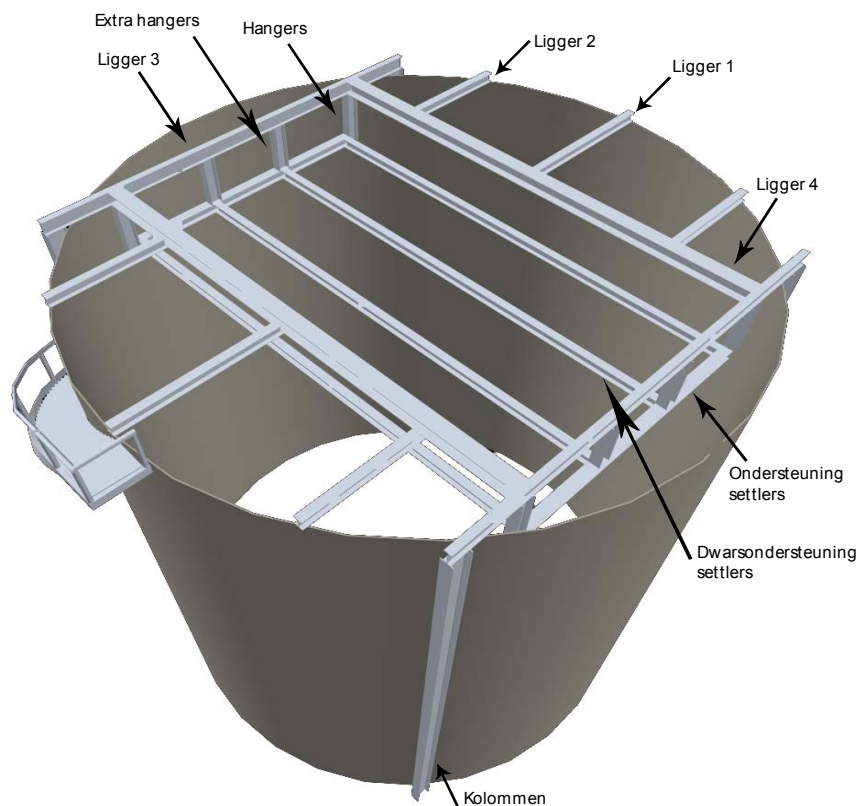
Onderdeel	aantal	Type	Profiel	Gewicht	Prijs
Ligger 1	2	staal	IPE 220	105	€ 210
Ligger 2	4	staal	IPE 200	72	€ 287
Ligger 3	2	staal	IPE 750 x 147	1472	€ 2.944
Ligger 4	2	staal	IPE 400	814	€ 1.627
Kolommen	4	staal	IPE 100	146	€ 583
Hangers	4	rvs	IPE 100	12	€ 389
Ondersteuning settlers	2	rvs	IPE 450	512	€ 8.195
Dwarsondersteuning settlers	4	rvs	IPE 180	224	€ 7.159
					€ 21.393

kilo's staal 5651
 kilo's RVS 1919

staal 1 euro/kg
 rvs 8 euro/kg

Variant 8

Verbeterde ondersteuning buiten de reactor



Anders dan bij variant 7
- ondersteuning settlers
- extra hangers
- ligger 3

Extra hangers

Aangezien de krachten in de hangers nog kleiner zijn dan bij variant 7 kunnen dit dezelfde profielen blijven. Alleen het aantal veranderd naar 8 stuks.

Ondersteuning settlers

Aangezien de krachten direct via de hangers naar de ligger 3 gaan, kunnen de ondersteuningsbalken een stuk lichter uitgevoerd worden

Voor de aansluitingen op de dwarsondersteuning is een gelijk formaat handig

Lengte		6,6 m
Profiel	IPE 180	
massa		18,8 kg/m
massa RVS	124	kg

Ligger 3

Lengte 10 m
dragende dakbreedte 0,6 m

Belastingsgeval 1 is maatgevend

	UGT	BGT	afstand tov oplegging
hanger 1	44,5	34,7	1,5
hanger 2	89,0	69,4	3,8
hanger 3	89,0	69,4	6,2
hanger 4	44,5	34,7	8,5
dakplaat	2,06	1,40	-
wandplaat	0,44	0,36	-
eigen gewicht	2,18	1,81	-

max moment 463,5 kNm
W benodigd 4811

	profiel [-]	I _y *10 ⁴ [mm ⁴]	W _y *10 ³ [mm ³]	massa [kg/m]	eg [kN/m]
Optie HE profiel	HE 650 A	175200	5474	189,7	1,86
Optie IPE profiel	IPE 750 x 185	223000	5821	185	1,81

Gekozen profiel IPE 750 x 185 223000 5821 185 1,81

doorbuigingsparamter 3744
max doorbuiging 40 mm
w midden 8,0 mm

kilogram staal 1850 kg
Oplegreacties 1 (BGT) 122 kN
Oplegreacties 1 (UGT) 157 kN

hoogte gekozen profiel (h) 766 mm
flensdikte gekozen profiel (t_f) 23,6 mm
lijfdikte gekozen profiel (t_w) 14,9 mm
hoogte lijf = $h_w = h - 2 * t_f$ 718,8 mm
breedte gekozen profiel (b) 267 mm

max dwarskracht $V_{z;s;d}$ 156,9 kN
max moment $M_{y;s;d}$ 464 kNm

$$V_{z;el;d} = h_w * t_w * \frac{f_{y;d}}{\sqrt{3}} \quad 1453 \text{ kN}$$

$$M_{y;el;d} = W_{y;el} * f_{y;d} \quad 1368 \text{ kNm}$$

Toetsing Dwarskracht (V) $\frac{V_{z;s;d}}{V_{z;el;d}} \leq 1$ 0,11

Toetsing Moment (M) $\frac{M_{y;s;d}}{M_{y;el;d}} \leq 1$ 0,34

lambda relatief 1,20

kip-factor 0,53

Toetsing Kip 0,64

$$\lambda_{rel} = 1,23 * \sqrt{\frac{l * h}{b * t_f} * \frac{f_y}{E}}$$

$$\frac{M_{y;s;d}}{M_{y;el;d}} \leq 1$$

$$\omega_{kip} * M_{y;el;d}$$

Uitvoer

Onderdeel	aantal	Type	Profiel	Gewicht	Prijs
Ligger 1	2	staal	IPE 220	105	€ 210
Ligger 2	4	staal	IPE 200	72	€ 287
Ligger 3	2	staal	IPE 750 x 185	1850	€ 3.700
Ligger 4	2	staal	IPE 400	814	€ 1.627
Kolommen	4	staal	IPE 100	146	€ 583
Hangers	8	rvs	IPE 100	12	€ 778
Ondersteuning settlers	2	rvs	IPE 180	124	€ 1.985
Dwarsondersteuning settlers	4	rvs	IPE 180	224	€ 7.159

€ 16.329

kilo's staal 6407

kilo's RVS 1143

staal 1 euro/kg

rvs 8 euro/kg

Overzicht

Variant	Kosten ondersteuningsconstructie	Kosten dak	Kosten reactorwand	totale kosten	relatief
2	€ 42.138	€ 13.329	€ 470.541	€ 526.008	1,7%
3	€ 27.932	€ 13.329	€ 494.217	€ 535.478	3,5%
5	€ 16.089	€ 13.329	€ 494.217	€ 523.635	1,2%
6	€ 28.474	€ 13.329	€ 470.541	€ 512.344	-0,9%
7	€ 21.393	€ 13.329	€ 470.541	€ 505.263	-2,3%
8	€ 16.329	€ 13.329	€ 470.541	€ 500.199	-3,3%

Berekend op basis van kiloprijzen:

	gemiddelde kosten	€ 517.154
staal	1 euro per kilo	
rvs	8 euro per kilo	

Toegepaste HE profielen

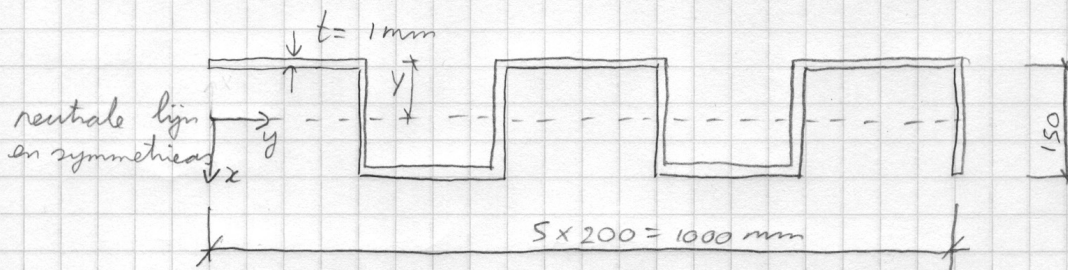
nr	profiel	massa	hoogte	breedte	tw	tf	oppervlak	iy	iz	Wy	Wz	traagheidsstraal y	traagheidsstraal x
1	HE 100 A	16,7	96	100	5,0	8,0	21,2	349	134	73	27	40,6	25,1
2	HE 120 A	19,9	114	120	5,0	8,0	25,3	606	231	106	39	48,9	30,2
3	HE 140 A	24,7	133	140	5,5	8,5	31,4	1033	389	155	56	57,3	35,2
4	HE 160 A	30,4	152	160	6,0	9,0	38,8	1673	616	220	77	65,7	39,8
5	HE 180 A	35,5	171	180	6,0	9,5	45,3	2510	925	294	103	74,5	45,2
6	HE 200 A	42,3	190	200	6,5	10,0	53,8	3692	1336	389	134	82,8	49,8
7	HE 220 A	50,5	210	220	7,0	11,0	64,3	5410	1955	515	178	91,7	55,1
8	HE 240 A	60,3	230	240	7,5	12,0	76,8	7763	2769	675	231	101,0	60,0
9	HE 260 A	68,2	250	260	7,5	12,5	86,8	10450	3668	836	282	110,0	65,0
10	HE 280 A	76,4	270	280	8,0	13,0	97,3	13670	4763	1013	340	119,0	70,0
11	HE 300 A	88,3	290	300	8,5	14,0	113,0	18260	6310	1260	421	127,0	74,9
12	HE 320 A	97,6	310	300	9,0	15,5	124,0	22930	6985	1479	466	136,0	74,9
13	HE 340 A	104,8	330	300	9,5	16,5	133,0	27690	7436	1678	496	144,0	74,6
14	HE 360 A	112,1	350	300	10,0	17,5	143,0	33090	7887	1891	526	152,0	74,3
15	HE 400 A	124,8	390	300	11,0	19,0	159,0	45070	8564	2311	571	168,0	73,4
16	HE 450 A	139,8	440	300	11,5	21,0	178,0	63720	9465	2896	631	189,0	72,9
17	HE 500 A	155,1	490	300	12,0	23,0	198,0	86970	10370	3550	691	210,0	72,4
18	HE 550 A	166,2	540	300	12,5	24,0	212,0	111900	10820	4146	721	230,0	71,5
19	HE 600 A	177,8	590	300	13,0	25,0	226,0	141200	11270	4787	751	250,0	70,5
20	HE 650 A	189,7	640	300	13,5	26,0	242,0	175200	11720	5474	782	269,0	69,7
21	HE 700 A	204,5	690	300	14,5	27,0	260,0	215300	12180	6241	812	288,0	68,4
22	HE 800 A	224,4	790	300	15,0	28,0	286,0	303400	12640	7682	843	326,0	66,5
23	HE 900 A	251,6	890	300	16,0	30,0	321,0	422100	13550	9485	903	363,0	65,0
24	HE 1000 A	272,3	990	300	16,5	31,0	347,0	553800	14000	11190	934	400,0	63,5

Toegepaste IPE profielen

nr	Profiel	massa	hoogte	breedte	tw	tf	oppervlak	iy	iz	Wy	Wz	traagheidsstraal y	traagheidsstraal x
1	IPE 100	8,1	100	55	4,1	5,7	10,3	171	16	34	6	40,7	12,4
2	IPE 120	10,4	120	64	4,4	6,3	13,2	318	28	53	9	49,0	14,5
3	IPE 140	12,9	140	73	4,7	6,9	16,4	541	45	77	12	57,4	16,5
4	IPE 160	15,8	160	82	5,0	7,4	20,1	869	68	109	17	65,8	18,4
5	IPE 180	18,8	180	91	5,3	8,0	23,9	1317	101	146	22	74,2	20,5
6	IPE 200	22,4	200	100	5,6	8,5	28,5	1943	142	194	29	82,6	22,4
7	IPE 220	26,2	220	110	5,9	9,2	33,4	2772	205	252	37	91,1	24,8
8	IPE 240	30,7	240	120	6,2	9,8	39,1	3892	284	324	47	99,7	26,9
9	IPE 270	36,1	270	135	6,6	10,2	45,9	5790	420	429	62	112,0	30,2
10	IPE 300	42,2	300	150	7,1	10,7	53,8	8356	604	557	81	125,0	33,5
11	IPE 330	49,1	330	160	7,5	11,5	62,6	11770	788	713	99	137,0	35,5
12	IPE 360	57,1	360	170	8,0	12,7	72,7	16270	1043	904	123	150,0	37,9
13	IPE 400	66,3	400	180	8,6	13,5	84,5	23130	1318	1156	146	165,0	39,5
14	IPE 450	77,6	450	190	9,4	14,6	98,8	33740	1676	1500	176	185,0	41,2
15	IPE 500	90,7	500	200	10,2	16,0	116,0	48200	2142	1928	214	204,0	43,1
16	IPE 550	105,5	550	210	11,1	17,2	134,0	67120	2668	2441	254	223,0	44,5
17	IPE 600	122,4	600	220	12,0	19,0	156,0	92080	3387	3069	308	243,0	46,6
18	IPE 750 x 147	147,2	753	265	13,2	17,0	187,0	166100	5289	4411	399	298,0	53,1
19	IPE 750 x 185	185,0	766	267	14,9	23,6	236,0	223000	7510	5821	563	308,0	56,5

C. Handberekeningen doorbuiging liggers

Traagheidsmoment geprofileerde dakplaat



Dunwandig profiel ($t \ll h$)

$$I_{z, \text{totaal}} = 5 \times I_{z, \text{lijf}} + 5 \cdot I_{z, \text{flens, stein, ... stein}}$$

$$I_{z, \text{lijf}} = \frac{1}{12} \cdot t \cdot h^3 = \frac{1}{12} \cdot 1 \cdot 150^3 = 281250 \text{ mm}^4$$

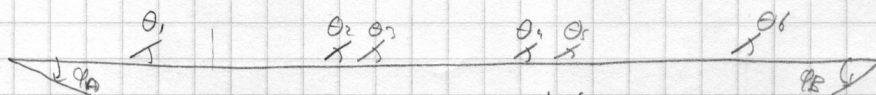
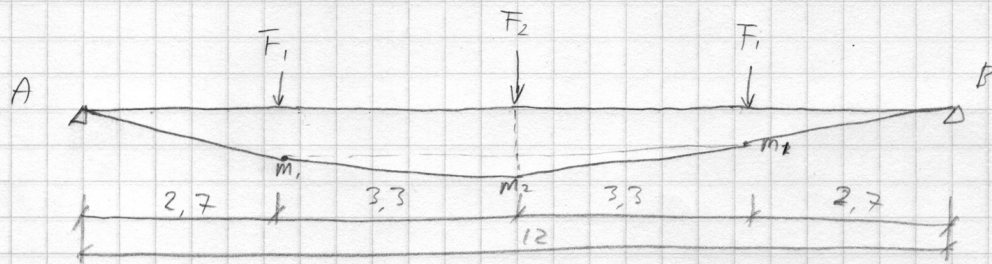
$$I_{z, \text{flens, stein}} = y^2 \cdot A = \left(\frac{1}{2} \cdot 150\right)^2 \cdot 200 \cdot 1 = 1125000 \text{ mm}^4$$

$$I_{z, \text{totaal}} = 5 \times 281250 + 5 \cdot 1125000 = 703 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

$$W = \frac{I_{z, \text{totaal}}}{\frac{1}{2} h} = \frac{703 \cdot 10^4}{\frac{1}{2} \cdot 150} = 93,7 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

↳ y-as is symmetrisch

Variant 2 - Ligger 4



$$\theta_1 = \frac{1}{2} \cdot 2.7 \cdot m_1$$

$$\theta_2 = \frac{1}{2} \cdot 3.3 \cdot m_1$$

$$\theta_3 = \frac{1}{2} \cdot 3.3 \cdot (m_2 - m_1)$$

$$\theta_4 = \theta_3$$

$$\theta_5 = \theta_2$$

$$\theta_6 = \theta_1$$

afst tot B

$$\frac{1}{2} \cdot 2.7 + 3.3 + 3.3 + 2.7 = 10.2$$

$$\frac{1}{2} \cdot 3.3 + 6 = 7.65$$

$$\frac{1}{2} \cdot 3.3 + 6 = 7.1$$

$$2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 3.3 + 2.7 = 4.9$$

$$\frac{1}{2} \cdot 3.3 + 2.7 = 4.35$$

$$2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 2.7 = 1.8$$

afst tot m

$$4.2$$

$$1.65$$

$$1.1$$

$$W_B = 0 \Rightarrow \varphi_A \cdot 12 = \theta_1 \cdot (10.2 + 1.8) + \theta_2 \cdot (7.65 + 4.35) + \theta_3 \cdot (7.1 + 4.9)$$

$$= 12 (\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$$

$$\varphi_A = 1.35 \cdot m_1 + 3.3 m_1 + 1.65 m_2 - 1.65 m_1$$

$$= 3 m_1 + 1.65 m_2$$

$$EI \cdot W_m = \varphi_A \cdot 6 - \theta_1 \cdot 4.2 - \theta_2 \cdot 1.65 - \theta_3 \cdot 1.1$$

$$= 18 m_1 + 9.9 m_2 - 5.67 m_1 - 5.445 m_1 - 1.815 m_2 + 1.815 m_1$$

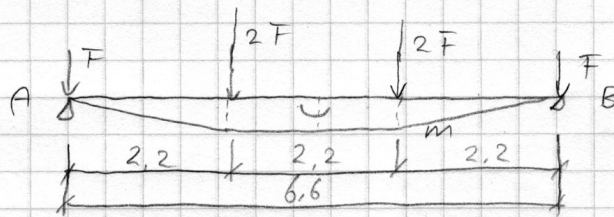
$$= 8.7 m_1 + 8.085 m_2$$

$$m_1 = 111.8 \text{ kNm} \quad (\text{CBGT})$$

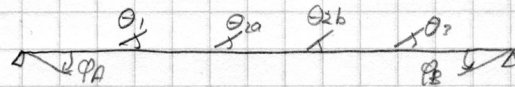
$$m_2 = 164.7 \text{ kNm} \quad (\text{CBGT})$$

$$EI \cdot W_m = 2304 \quad 2304$$

Variant 2 - Ondersteuning Settlers



$$M = 2F \cdot 2,2 \\ = 4,4F$$



$$\theta_1 = \frac{1}{2} \cdot 2,2 \cdot m = 1,1m$$

af A t B

$$\frac{1}{2} \cdot 2,2 + 4,4 = 5,13$$

af A tot m

$$\frac{1}{2} \cdot 2,2 + 1,1 = 1,83$$

$$\theta_{2a} = \frac{1}{2} \cdot 1,1 \cdot m$$

$$\frac{1}{2} \cdot 1,1 + 1,1 + 2,2 = 3,85$$

$$\frac{1}{2} \cdot 1,1 = 0,55$$

$$\theta_{2b} = 1,1 \cdot m$$

$$\frac{1}{2} \cdot 1,1 + 2,2 = 2,75$$

$$\theta_3 = \frac{1}{2} \cdot 2,2 \cdot m = 1,1m$$

$$\frac{2}{2} \cdot 2,2 = 1,47$$

$$W_B = 0 \Rightarrow 6,6 \cdot \varphi_A = \theta_1 \cdot 5,13 + \theta_{2a} \cdot 3,85 + \theta_{2b} \cdot 2,75 + \theta_3 \cdot 1,47$$

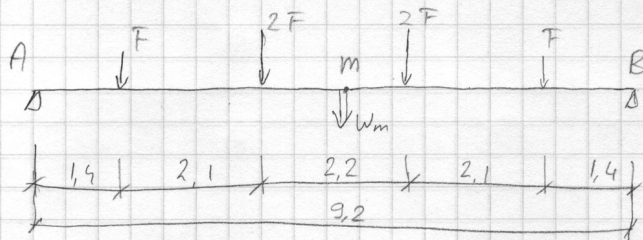
$$= \frac{13,2}{6,6} \theta = 2,2 m$$

$$EI \cdot W_m = \varphi_A \cdot 3,3 - \theta_1 \cdot 1,83 - \theta_{2a} \cdot 0,55$$

$$= 7,26 m - 2,01 m - 0,61 m$$

$$= 4,64 m = 20,4 F$$

Variant 3 - Roofdligger (1^e Randberekening, ondertussen andere M-waarden)



$$\begin{aligned}\theta_1 &= \theta_4 \\ \theta_2 &= \theta_6 \\ \theta_3 &= \theta_5\end{aligned}$$

θ	$\int \frac{m}{EI}$	afstand tot B	$\int \frac{m}{EI}$
1	$\frac{1}{2} \cdot 189 \cdot 1,4 / EI$	8,27	$132,3 / EI$
2	$189 \cdot 2,1 / EI$	6,75	$396,9 / EI$
3	$\frac{1}{2} \cdot 185 \cdot 2,1 / EI$	6,4	$194,25 / EI$
4	$374 \cdot 2,2 / EI$	4,6	$822,8 / EI$
5	zie 3	2,8	$194,25 / EI$
6	zie 2	2,45	$396,9 / EI$
7	zie 1	0,93	$132,3 / EI$

$$\begin{aligned}w_B = 0 = \varphi_A \cdot 9,2 - \frac{132,3 \cdot 8,27}{EI} - \frac{396,9 \cdot 6,75}{EI} - \frac{194,25 \cdot 6,4}{EI} - \frac{822,8 \cdot 4,6}{EI} \\ - \frac{194,25 \cdot 2,8}{EI} - \frac{396,9 \cdot 2,45}{EI} - \frac{132,3 \cdot 0,93}{EI}\end{aligned}$$

$$\varphi_A \cdot 9,2 \cdot EI = 10440$$

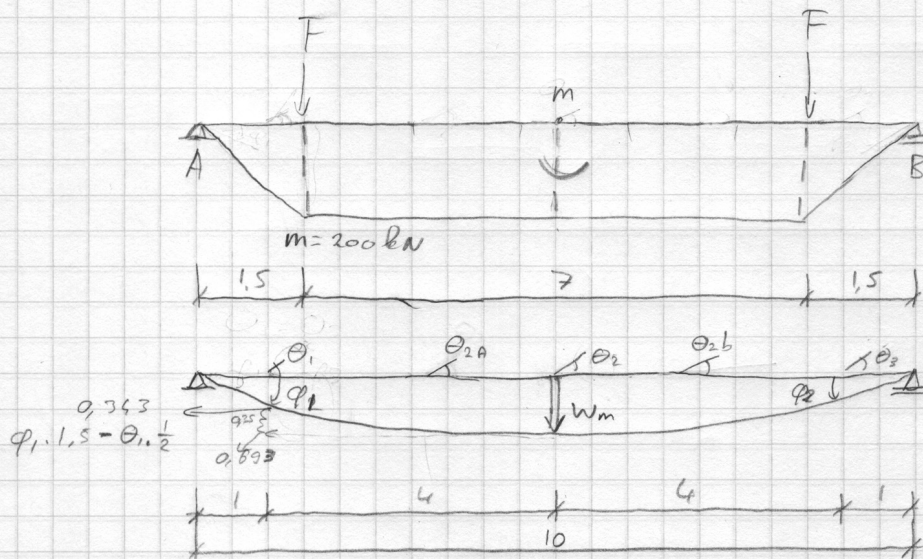
$$\varphi_A = 1134,85 / EI$$

$$w_m = \varphi_A \cdot 4,6 - \theta_1 \cdot 3,67 - \theta_2 \cdot 2,15 - \theta_3 \cdot 1,8$$

$$EI \cdot w_m = 1134,85 \cdot 4,6 - 132,3 \cdot 3,67 - 396,9 \cdot 2,15 - 194,25 \cdot 1,8 = 3531,8$$

$$I = \frac{3531,8}{E \cdot w_m}$$

Variant 7 - figuur 3



$$\theta_1 = \frac{1}{2} \cdot l_1 \cdot \frac{m}{EI}$$

$$l_1 = 1.5 \text{ m}$$

$$\theta_2 = l_2 \cdot \frac{m}{EI}$$

$$l_2 = 7 \text{ m}$$

$$\theta_{2A} = \theta_{2b} = \frac{1}{2} \theta_2$$

$$\theta_3 = \theta_1$$

$$W_m = \varphi_1 \cdot 5 \text{ m} - \theta_1 \cdot 4 \text{ m} - \theta_{2A} \cdot \frac{7}{4} \text{ m}$$

$$W_B = 0 = \varphi_1 \cdot 10 \text{ m} - \theta_1 \cdot 9 \text{ m} - \theta_2 \cdot 5 \text{ m} - \theta_3 \cdot 1 \text{ m}$$

$$\hookrightarrow \varphi_1 \cdot 10 = \theta_1 \cdot 10 + \theta_2 \cdot 5$$

$$= \frac{1}{2} l_1 \frac{m}{EI} \cdot 10 + \frac{l_2 m}{EI} \cdot 5$$

$$\varphi_1 = \frac{1}{2} \frac{m}{EI} (l_1 + l_2)$$

$$W_m = 5 \cdot \frac{1}{2} \frac{m}{EI} (l_1 + l_2) - \frac{4}{2} \frac{m}{EI} l_1 - \frac{7}{4} \cdot \frac{1}{2} \frac{m}{EI} \cdot l_2$$

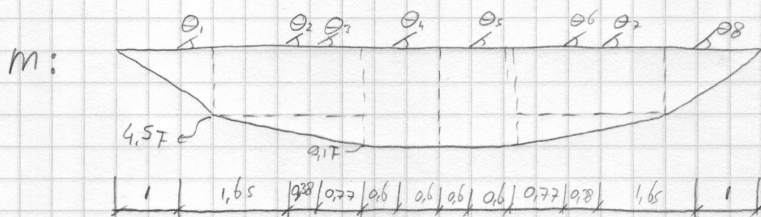
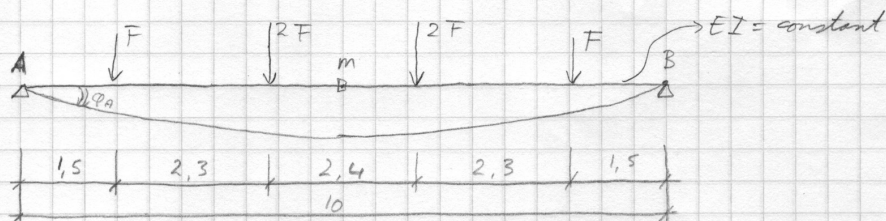
$$= \frac{m}{EI} \cdot \left(\frac{5}{2} l_1 - \frac{4}{2} l_1 + \frac{5}{2} l_2 - \frac{7}{8} l_2 \right)$$

$$= \frac{97}{8} \frac{m}{EI}$$

$$W_m \leq W_{\max}$$

$$I_{\text{ben}} \geq \frac{97}{8} \frac{m}{E \cdot W_{\max}}$$

Variant 8 - Ligger 3



Θ	$\int m$	afstand t.o.v. B	afstand t.o.v. m
1	$\frac{1}{2} \cdot 4.5F \cdot 1.5 = 3.4 F$	9	4
2	$4.5F \cdot 2.3 = 10.4 F$	7.35	2.35
3	$\frac{1}{2} \cdot 4.6F \cdot 2.3 = 5.3 F$	7	1.97
4	$1.2 \cdot 9.1F = 10.9 F$	5.6	0.6
5	$1.2 \cdot 9.1F = 10.9 F$	4.4	
6	$\frac{1}{2} \cdot 6.1F \cdot 2.3 = 5.3 F$	3	
7	$3 \cdot F \cdot 2.3 = 10.4 F$	2.65	
8	$\frac{1}{2} \cdot 3F \cdot 1.5 = 3.4 F$	1	

$$EI \cdot W_B = 0 \Rightarrow \varphi_A \cdot 10 = 3.4 F \cdot 9 + 10.4 F \cdot 7.35 + 5.3 F \cdot 7 + 10.9 F \cdot 5.6 + 3.4 F \cdot 1 + 10.4 F \cdot 2.65 + 5.3 F \cdot 3 + 10.9 F \cdot 4.4$$

$$= 300 \cdot F$$

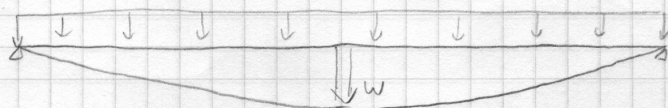
$$\varphi_A = 30 \cdot F$$

$$EI \cdot W_m = \varphi_A \cdot 5 - \Theta_1 \cdot 4 - \Theta_2 \cdot 2.35 - \Theta_3 \cdot 1.97 - \Theta_4 \cdot 0.6$$

$$= 30 \cdot F \cdot 5 - 3.4 F \cdot 4 - 10.4 F \cdot 2.35 - 5.3 F \cdot 1.97 - 10.9 F \cdot 0.6$$

$$= 94.5 F$$

superpositie q-last:



$$W = \frac{5}{384} \cdot \frac{q l^4}{EI}$$

$$EI \cdot W = \frac{5}{384} \cdot q l^4$$

$$\text{totaal: } EI \cdot W = 94.5 \cdot F + \frac{5}{384} \cdot q l^4$$

D. Tekening overzicht alternatieven