

13 Juni 2018

Het implementeren van het richtend moment in een zeilhangbank

SAILING INNOVATION CENTRE
SCHEVENINGEN



AFSTUDEERSCHRIPTIE

Daniël Kersing & Marco Bremmers

The Hague University

Opleiding Bewegingstechnologie
Haagse Hogeschool
Den Haag, Juni 2018

13 Juni 2018

Het implementeren van het richtend moment in een zeilhangbank

SAILING INNOVATION CENTRE
SCHEVENINGEN

AFSTUDEERSCHRIPTIE

Daniël Kersing & Marco Bremmers

The Hague University

Opleiding Bewegingstechnologie
Haagse Hogeschool
Den Haag, Juni 2018

Studentnummers: 14093812 & 14081024

1^e Begeleider: Dhr. H. Faber
2^e Begeleider: Dhr. M. van der Ent

Voorwoord

Dit rapport is geschreven in het kader van ons afstuderen aan de opleiding Mens en techniek | Bewegingstechnologie aan de Haagse Hogeschool. Uitgevoerd aan het Sailing Innovation Centre te Scheveningen. Het rapport is opgesteld door Daniël Kersing en Marco Bremmers.

Het afstudeerverslag is bestemd voor docenten van de opleiding Mens en techniek | Bewegingstechnologie, werknemers van het Sailing Innovation Centre en uiteraard overige geïnteresseerden die het verslag willen raadplegen en gebruiken.

Ons dank gaat uit naar de personen die ons hebben geholpen en begeleid hebben met het verwezenlijken van ons project.

- Dhr. Douwe Broekens, bewegingswetenschapper bij het Sailing Innovation Centre.
- Dhr. Koen Muilwijk, ICT en Elektro beheerder bij het Sailing Innovation Centre.
- Dhr. Roland Roest, Sales Engineer bij Stekon.

Wij wensen u veel leesplezier,

Marco Bremmers & Daniël Kersing

Scheveningen, juni 2018
Mensen en Techniek | Bewegingstechnologie
Sailing Innovation Centre

Inhoudsopgave

Voorwoord	1
Samenvatting	5
1. Inleiding	6
1.1 Probleemstelling	6
1.2 Hoofdvraag en doelstelling	7
2. Analysefase	8
2.1 Oriëntatie van de huidige hangbank	8
2.2 Theoretisch onderzoek	9
2.2.1 Definiëren van coördinatensystemen	9
2.2.2 Het richtend moment	10
2.3 Marktonderzoek	16
2.3.1 Tension/compression disk	16
2.3.2 S-Beam load cell	16
2.3.3 Stensit load sensing pin	16
3. Programma van eisen en wensen	17
4. Sensor validatie	18
4.1 Stensit Load Sensing pin	18
4.2 S-beam load cell	20
5. Meetopstelling	21
5.1 Draaipunt	21
5.2 Sensorverwerking	21
5.2.1 Eerste meetopstelling	21
5.2.2 Proefopstellingen tweede meetopstelling	22
5.3 Definitieve meetopstelling	23
6. Het realiseren van de meetopstelling	24
6.1 Benodigdheden	24
6.2 Implementatie	24
6.3 Sensor signaalverwerking	25
7. Testfase	26
7.1 Testprotocol	26
7.1.1 Benodigdheden	26
7.1.2 Opstelling	26
7.1.2. Methode	26
7.1.3 Statistiek	27
7.2 Resultaten	27
8. Evaluatiefase	28
8.1 Statistiek	28
8.1.1 Betrouwbaarheid	28
8.1.2 Validiteit	28
8.2 Terugblik op de randvoorwaarden, eisen en wensen	30
9. Discussie	31
10. Conclusie	32
Bibliografie	33
Bijlage	34

Bijlage I - Signaalverwerking van de hangbank	34
Bijlage II - Rinstrum 1101 versterker	36
Bijlage III - Uitwerkingen vergelijkingen hoofdstuk 2.2.2	39
Bijlage IV – Datasheets sensoren marktonderzoek	41
Bijlage V – Valideren sensor	44
Bijlage VI- Aanpassingen hangbank	45
Bijlage VII- Technische gegevens aluminium BSB-profiel	48
Bijlage VIII - Simulatie van het blokje	49
Bijlage IX – Arduino Code	56
Bijlage X - Definitief programma van eisen en wensen	57

Samenvatting

Het Sailing Innovation Centre is een dynamisch en innovatief bedrijf binnen de zeilsport wat de samenwerking tussen wetenschap, sport en bedrijfsleven stimuleert. Het centrum beschikt over een hangbank waarmee zeilers kunnen trainen. De hangbank bevat een forceplate en een hangband waarmee krachten gemeten kunnen worden. Binnen het centrum is de onderzoeksvraag verzezen of een toenemende spierspanning in de m. quadriceps invloed heeft op het richtend moment. Hiervoor moet de hangbank inzicht geven in het richtend moment. Dit is het niet geval en daarmee is de doelstelling: de hangbank moet zo aangepast of uitgebreid worden dat deze in real-time het *richtend moment* weer kan geven. Hiertoe moet er een meetopstelling in de hangbank geïmplementeerd worden. De belangrijkste randvoorwaarde is dat er geen budget beschikbaar is voor aanpassingen aan de bank. De belangrijkste eisen zijn dat de hangbank valide waardes moet geven met een maximale meetfout van 5% en dat er aan beide zijdes van de hangbank, het richtend moment gemeten moet kunnen worden.

De huidige opstelling voldoet niet om het richtend moment te meten. Als men dit wel wil moet er een sensor aangeschaft worden die in x, y en z-richting kan meten en moet deze in de hangband geïmplementeerd worden. Deze sensoren zijn te duur aangezien er geen budget beschikbaar is. De keuze is gemaakt om een treksensor aan de hangbank toe te voegen in een meetopstelling. Hiervoor is er gekeken naar een manier om het moment te kunnen meten door een sensor tussen de boot en de buitenwereld te plaatsen die de hangbank in evenwicht houdt. De sensor meet de kracht die nodig is voor een tegengesteld moment aan de kant waar de zeiler niet zit. Daarmee kan het richtend moment berekend worden. De opstelling is getest in IP en hiermee is aangetoond dat de opstelling werkt. Om de opstelling te realiseren is een Stensit load sensing pin beschikbaar gesteld door het centrum. Uit het marktonderzoek blijkt dat de beste optie een S-beam load sensor is. In verband met de kosten is de Stensit load sensing toch gevalideerd. Deze is niet valide (meetfout > 5%) en de S-beam load cell is dit wel (meetfout < 5%). De laatste is toch aangeschaft.

De hangbank moet een draaipunt bevatten om het moment om te kunnen meten. De huidige bank bevat geen draaipunt en is hiervoor aanpassingen ondergaan. Hierbij is de opdracht gegeven om een oude zeilsimulator te gebruiken. Er is een eerste meetopstelling bedacht waarmee met een sensor aan beide kanten het moment gemeten kan worden. Deze is verworpen omdat de opdrachtgever vereist dat er één outputsignaal komt voor het meten van het moment, aan beide zijden. Een tweede meetopstelling is bedacht waarmee met één sensor aan beide kanten gemeten kan worden. Deze is geïmplementeerd in de hangbank. Via staaldraad, wat door katrollen en langs een as loopt, kan het moment gemeten worden aan beide zijden.

De meetopstelling is getest door een bekend moment uit te oefenen op de hangbank door middel van het plaatsen van gewichten op een balk. Er zijn gewichten tussen 0-100 kg opgelegd, in stappen van 10kg. Hierbij is het moment bij zowel opgaand (0-100kg) als aflopend (100-0kg) genoteerd. Dit is driemaal herhaald. Hieruit blijkt dat het systeem betrouwbaar is ($ICC > 0,999$, $p = 0,000$). Het systeem is niet valide (meetfout > 5%). Bij een oplopend moment is een correctie mogelijk door een lineair toenemende afwijking. Hiermee is de meetfout < 5% bij een moment > 20kgm. Bij een aflopend moment is het systeem niet valide. Daarmee voldoet het systeem aan 5 van de 6 eisen.

Enkele redenen hiervoor kunnen zijn: weerstand in het staaldraad, de katrollen of de rollagers, het doorbuigen van het dek en het frame of het feit dat beide zijden en beide stukken staaldraad samenlopen over dezelfde as. Om dit te bevestigen is een vervolgonderzoek nodig.

Er kan geconcludeerd worden dat aan de doelstelling is voldaan. Het systeem voldoet aan 5/6 eisen en aan de gestelde wens.

1. Inleiding

Het Sailing Innovation Centre is een dynamisch en innovatief bedrijf binnen de zeilsport. Het centrum stimuleert de samenwerking tussen wetenschap, sport en het bedrijfsleven. Zo worden er nieuwe wegen binnen de technische kanten van de zeilsport gezocht zoals het meten en voorspellen van wind en stroming met technische apparatuur. Hiermee kunnen zij een voorsprong opbouwen ten opzichte van de concurrenten. Daarnaast wordt er ook gewerkt aan het ontwikkelen, analyseren en verbeteren van de fysieke fitheid van de zeilers. Dit doen zij door videoanalyses, monitoring en feedback terug te koppelen om de sportprestaties te verbeteren.

Het analyseren en het nabootsen van de werkelijkheid is een vereiste binnen het trainingsprogramma van de topsporters. Om betere analyses en trainingen te simuleren binnen het Sailing Innovation Centre wordt er gebruik gemaakt van een hangbank. De hangbank bestaat uit een afgezaagd dek van een Laser-zeilboot (*afbeelding 1*) met een ingebouwde forceplate.

In de voetenband is ook een sensor geplaatst om hieruit de kracht uit te lezen.



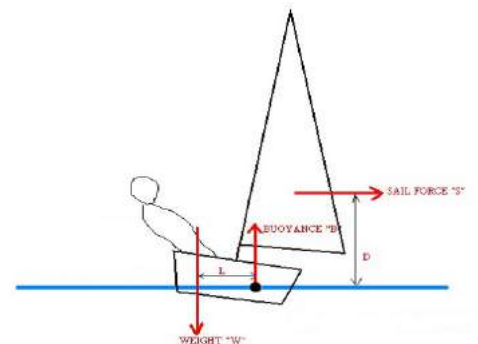
Afbeelding 1: Een Laserzeilboot is een één persoons zeilboot.

1.1 Probleemstelling

Binnen het Sailing Innovation Centre is de volgende vraag bedacht: 'Heeft een verhoogde spierspanning in de m. quadriceps een significant effect op het richtend moment bij het leunen buiten de boot?'

Om antwoord te kunnen geven op deze vraag, is het van belang om het richtend moment in kaart te kunnen brengen. Het richtend moment is het moment dat een persoon veroorzaakt op de boot als deze buiten de boot leunt. De bestuurder van de boot leunt naar buiten om het 'center of mass' van zichzelf buiten de boot te verplaatsen. Dit moet in de praktijk even groot zijn als het moment wat het zeil creëert door de windkracht op het zeil (*afbeelding 2*). Deze momenten hebben als momentencentrum het 'point of buoyancy'. Als deze twee momenten elkaar opheffen is het voor de zeiler mogelijk de boot plat op het water te houden, wat voor de optimale snelheid gewenst is (Broekens, 2018).

Momenteel kan het richtend moment niet afgelezen worden in de huidige hangbank. Als men het richtend moment wil meten of berekenen zal er een uitbreiding c.q. aanpassing aan de hangbank gemaakt moeten worden. Zodat het richtend moment berekend kan worden met behulp van de huidige sensoren ofwel gemeten kan worden met een nieuwe, toegevoegde sensor.



Afbeelding 2: Om de boot vlak te houden moet het richtend moment even groot zijn als de als het moment ten gevolge van de windkracht, uit (Michalak, 2012).

1.2 Hoofdvraag en doelstelling

Het Sailing Innovation Centre streeft ernaar de hangbank te kunnen gebruiken voor uitgebreidere onderzoeken. Daarnaast moet het in de toekomst een '*Plug and play*' systeem worden waarmee een zeiler zelf metingen kan uitvoeren en feedback kan krijgen. Voor dit afstudeerproject zal daarom gefocust worden op het in kaart brengen van het *richtend moment*, zodat in de toekomst verdere onderzoeken en uitbreidingen aan de hangbank mogelijk zijn en er meer inzicht geboden kan worden in de invloeden op dit moment.

De **doelstelling** is daarmee: de hangbank moet zo aangepast of uitgebreid worden dat deze in real-time het *richtend moment* weer kan geven. Hiertoe moet er een meetopstelling in de hangbank geïmplementeerd worden.

De **doelgroep** zijn de zeilers en trainers die uiteindelijk met de hangbank moeten trainen. Voor deze doelgroep zal een accurate en bruikbare aanpassing gemaakt worden.

Afbakening: dit project betreft alleen het bedenken en implementeren van een meetopstelling die het richtend moment meet, zodat er in real-time een richtend moment weergegeven kan worden bij gebruik van de hangbank.

De volgende randvoorwaarden zijn gesteld vanuit het centrum:

R1	De hangbank moet inzicht geven in het <i>richtend moment</i> en dit op een scherm weergeven.
R2	De functie van de forceplate van de hangbank moet gewaarborgd blijven.
R3	Ruimte is beperkt, de hangbank moet op dezelfde plaats kunnen blijven staan en aanpassingen moeten dit toelaten.
R4	Er is geen budget beschikbaar voor aanpassingen aan de hangbank.

En daarbij zijn de volgende eisen gesteld:

E1	De meetopstelling moet valide waardes geven, de afwijking mag maximaal 5% zijn.
E2	Een persoon moet aan beide zijden van de hangbank het moment kunnen meten.

Als laatste zijn de volgende wensen gesteld:

W1	Het systeem moet een ' <i>Plug and Play</i> ' systeem worden. Een zeiler moet zelf metingen kunnen uitvoeren.
----	---

Het project kent daarmee elementen van analyse, onderzoek, ontwerp en uitvoering. Aangezien een door sporters praktisch te gebruiken product moet ontstaan, is geen van de genoemde elementen dominant.

2. Analysefase

2.1 Oriëntatie van de huidige hangbank

De huidige hangbank is voorzien van verschillende meetinstrumenten. Voor gebruik moet de persoon in de hangbank gaan zitten zoals op afbeelding 3 is weergegeven. De zeiler plaatst zijn voeten onder de band waardoor hij buiten de boot kan hangen. Aan de voorzijde van de boot staat een scherm waarop feedback te zien is voor de zeiler.

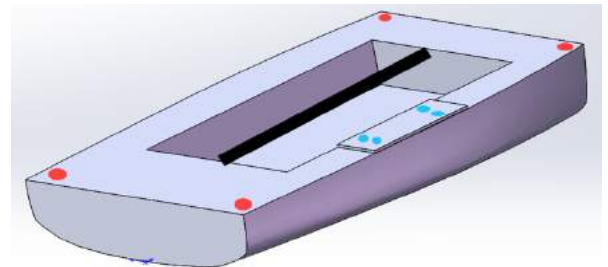
De hangbank bestaat uit het dek van een Laser, een forceplate en een treksensor in de hangband. De sensoren die momenteel zijn toegepast in de bank zijn met verschillende kleuren weergegeven in het model op afbeelding 4:

- **Blauwe sensoren:** In het midden van het dek is de forceplate verwerkt. Deze forceplate is voorzien van vier druksensoren. Deze sensoren drukken de krachten uit in mV. Met een meetversterker wordt dit omgezet naar kilogram. De druksensoren horen uitgelijnd te zijn en in verhouding te liggen. Dit is echter niet het geval. Doordat de forceplate symmetrisch is geïnstalleerd hoeft er geen onderscheid gemaakt te worden of de zeiler aan stuur- of bakboord (t.o.v. de vaarrichting rechts en links) zit.
- **Hangband:** Ook bevindt zich in de bank een hangband. Wanneer de gebruiker zijn voeten onder de hangband plaatst (afbeelding 4) en buiten de boot leunt, ontstaat hier een kracht. Deze hangband is voorzien van een treksensor.

De informatie uit de forceplate en de hangband wordt ontvangen door een Arduino en Raspberry Pi (bijlage I). De microcontrollers zorgen voor een signaalovergang van de sensoren naar de computer.



Afbeelding 3: Positie van een persoon op de hangbank.



Afbeelding 4: Vereenvoudigd model van de hangbank in SolidWorks.

2.2 Theoretisch onderzoek

Om een meetopstelling te kunnen realiseren en implementeren zal er inzicht nodig zijn in het krachtenspel van een zeilboot bij het zeilen. Hiervoor is een theoretisch onderzoek gedaan.

2.2.1 Definiëren van coördinatensystemen

Bij het in kaart brengen van de krachten en momenten bij het zeilen is het essentieel dat er een duidelijk coördinatensysteem wordt gedefinieerd. In het boek 'de Aero- en hydrodynamica van het zeilen' (Slooff, 2013) worden er vier coördinatensystemen gebruikt (afbeelding 5):

Het schip-coördinatensysteem (ξ, η, ζ):

Gefixeerd op de boot; ξ -as longitudinaal, in het symmetrievlak; η -as loodrecht op het symmetrievlak en de ζ -as mee gekanteld met de boot.

Het Zeil-coördinatensysteem (x_0, y_0, z_0):

Gefixeerd op de zeilrichting; x_0 -as bevindt zich in het wateroppervlak bij kalm water, parallel met de snelheidsvector waar de boot naartoe gaat.

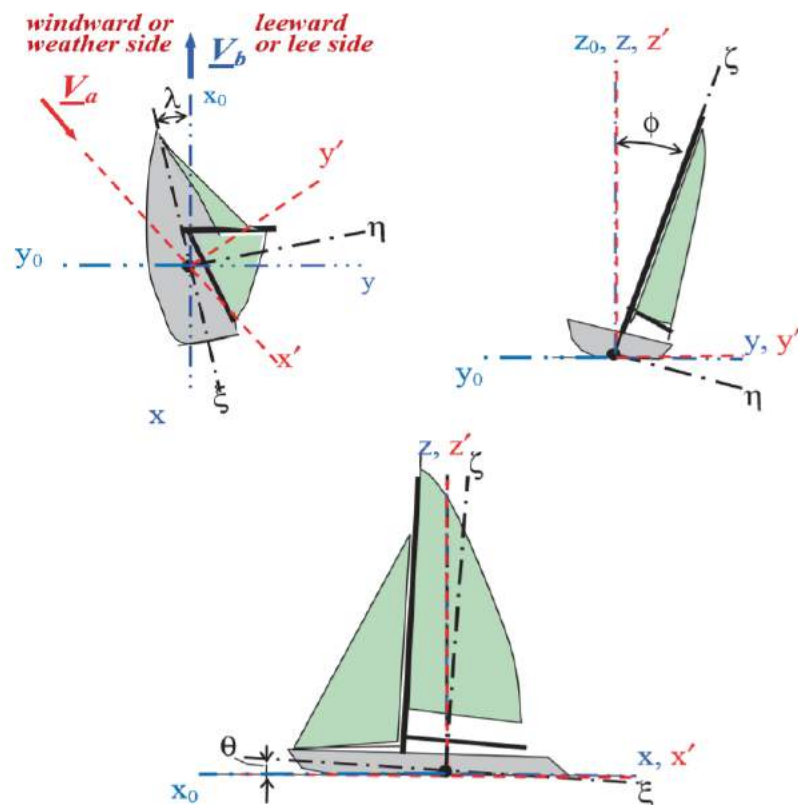
Het hydrodynamische coördinatensysteem (x, y, z):

Vergelijkbaar met het zeil-coördinatensysteem, maar de x -as is positief stroomafwaarts en de y -as is positief naar stuurboord.

Het aerodynamische coördinatensysteem (x', y', z'):

Gefixeerd met de inkomende wind; x' -as parallel met de relatieve windsnelheid-vector $\underline{V}_a$, y' -as parallel met het wateroppervlak bij kalm water en de z' -as verticaal.

In dit project is in overleg met de opdrachtgever aangenomen dat het rollen van de boot (rotatie om de ξ -as) zal plaatsvinden rondom de vaste ξ -as in plaats van het 'point of bouyancy'. Dit is in werkelijkheid het geval bij een situatie waarin de boot in kalm water ligt (Slooff, 2013). Dit voorkomt dat het project onnodig ingewikkeld wordt.



Afbeelding 5: Coördinatensystemen van een zeilboot, uit (Slooff, 2013).

2.2.2 Het richtend moment

Het richtend moment is het moment wat een persoon veroorzaakt als deze buiten de boot hangt (Marchaj, 1988).

Het richtend moment kan berekend worden met de volgende formule:

$$M_R = F * r \quad (1)$$

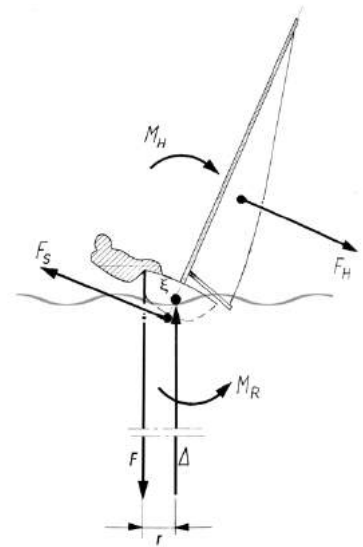
Waarbij M_R het richtend moment is in Nm , F de kracht in *Newton* en r de arm van de kracht in *meters*. Als er een opstelling mogelijk is waarbij de kracht gemeten kan worden en de positie achterhaald kan worden, dan kan daarmee het richtend moment berekend worden. Hiernaast (afbeelding 6) wordt het richtend moment M_R veroorzaakt door een translatie van krachtvector F over afstand r , ten opzichte van het draaipunt ξ , M_h is het moment wat veroorzaakt wordt door de wind. De momentenvergelijking luidt nu:

$$\sum M = 0 \quad \text{dus} \quad M_H = M_R \quad (2)$$

De zeiler moet zorgen dat beide momenten even groot zijn en tegengesteld gericht.

Het richtend moment kan berekend en gemeten worden met behulp van inwendige- of uitwendige sensoren:

- Inwendige sensoren zijn sensoren die krachten meten die zich binnen het free-bodydiagram bevinden (free-bodydiagram waarbij zeiler en zeilboot als één worden beschouwd, afbeelding 6).
- Uitwendige sensoren zijn de sensoren die zich tussen de zeilboot en de buitenwereld bevinden.



Afbeelding 6: Evenwicht van krachten en momenten in het laterale vlak.

Optie 1: Richtend moment berekenen/meten met de inwendige sensoren

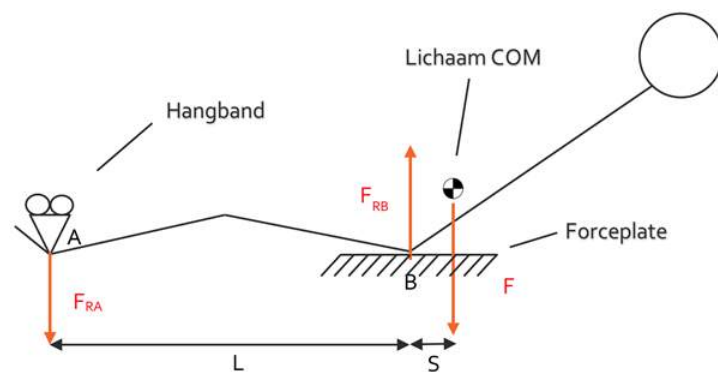
Er is onderzocht of het richtend moment bepaald kan worden met de huidige opstelling. Een persoon die buiten de hangbank hangt kan schematisch worden opgevat als de volgende statische situatie (afbeelding 7):

Hierin is F_{RA} de reactiekracht van de hangband op de voeten en F_{RB} de gemeten reactiekracht van de forceplate op de persoon. Het lichaamszwaartepunt van het lichaam zorgt voor een kracht F naar beneden.

In deze situatie geldt:

$$F_{RA} = F * \frac{S}{L} \quad (3)$$

$$F_{RB} = F * \frac{S+L}{L} \quad (4)$$



Afbeelding 7: Schematische weergave van de krachten van een persoon in de hangbank (let op: de krachten zijn niet in verhouding getekend).

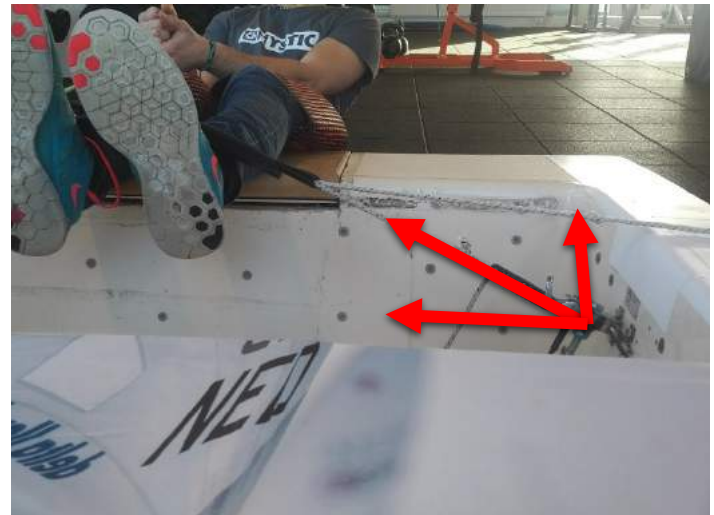
De kracht F_{RB} is bekend uit de forceplate. De afstand L is bekend, deze kan opgemeten worden.

Dat resulteert in de volgende onbekenden: F_{RA} , S , en F . In totaal zijn er daarmee twee vergelijkingen en drie onbekenden. Hiermee is het niet mogelijk de kracht F te berekenen, dus ook niet het richtend moment. F_{RA} of S moeten dus bekend worden.

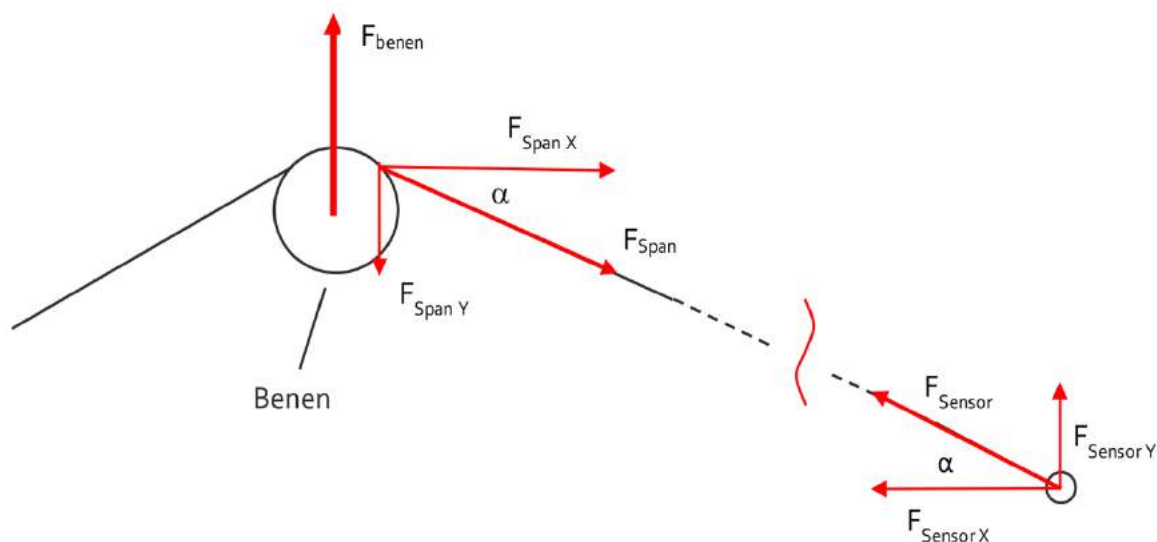
Om F_{RA} te berekenen is het vereist dat de richting van de kracht F_{sensor} in de hangband bekend is. In afbeelding 8 is weergegeven wat de sensor in de hangband meet in het zij aanzicht, met de bijbehorende verticale en horizontale krachtencomponenten.

Als een persoon zijn voeten onder de band plaatst, trekt de band terug naar beneden. In deze statische situatie zullen de benen op dezelfde plaats gehouden worden.

In afbeelding 9 is een schematische weergave gegeven:



Afbeelding 8: Zij aanzicht van de hangband als iemand buiten de boot hangt, de kracht die de hangband meet (F_{sensor}) is in het rood weergegeven, met bijbehorende x en y component.



Afbeelding 9: Schematische weergave krachten in de hangband en reactiekracht in de sensor.

Nu is dit een analyse van één kant van de hangband, namelijk de kant met de sensor erin. Er is echter ook een spankracht de andere kant op. Deze twee spankrachten zijn even groot. Aangezien het als een statische situatie beschouwd wordt geldt: $\sum F_y = 0$. Daarmee kan geconcludeerd worden dat de Y-component van de kracht in de sensor $F_{sensorY}$ half zo groot is als de kracht van de benen F_{Benen} . Dus als hoek α van F_{sensor} bekend is, kan F_{Benen} berekend worden. Daarmee is dan ook F_{RA} bekend.

$$F_{RA} = F_{Benen} \quad (5)$$

$$F_{Benen} = 2 * F_{sensor} * \sin(\alpha) \quad (6)$$

Wanneer F_{RA} bekend is, zijn daarmee twee onbekenden over en kunnen vergelijkingen (3) en (4) opgelost worden.

Het uitwerken en herleiden van de vergelijkingen (3) en (4) geeft het volgende voor S en F :

$$S = \frac{L}{\left(\frac{F_{RB}}{F_{RA}} - 1\right)} \quad (7)$$

$$F = L * \frac{F_{RA}}{\left(\frac{L}{\left(\frac{F_{RB}}{F_{RA}} - 1\right)}\right)} \quad (8)$$

De uitwerkingen zijn te vinden in bijlage III.

Hieruit kan geconcludeerd worden dat met de reactiekrachten F_{RA} en F_{RB} en lengte L de zwaartekracht berekend kan worden die het lichaamszwaartepunt op de boot levert. Als deze kracht F bekend is kan vervolgens het richtend moment berekend worden:

$$M_R = (L + S) * F \quad (9)$$

Bij bovenstaande situatie is er voor vereenvoudiging gekeken naar het ξ, ζ – vlak. In de werkelijkheid speelt het ξ, η – vlak ook een rol. Het is voor een zeiler namelijk mogelijk de hangband strakker of losser te zetten. Wanneer de hangband losser zit is duidelijk te zien dat deze ook zijwaarts in het ξ, η - vlak van de boot kan bewegen (*afbeelding 10*). De band kan in zo'n situatie dus makkelijk naar voren en achteren worden getrokken. Als het richtend moment berekend moet worden in deze situatie, moet er een nieuwe treksensor aangeschaft worden die trekkrachten kan meten in x, y en z-richting.

De voor- en nadelen van deze optie zijn:

Voordelen:

- De hangbank hoeft niet aangepast te worden.

Nadelen:

- Er moet een sensor aangeschaft worden die in x, y en z-richting kan meten.
- Meerdere omrekenstappen zijn nodig om het moment te berekenen.
- Er moet een x-y-z sensor geïmplementeerd worden in de hangbank.



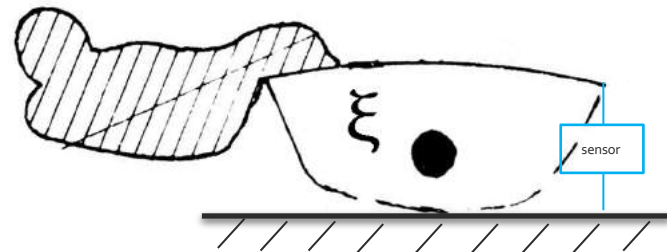
Afbeelding 10: Positie van de voeten en de hangband als deze losser is gezet.

Optie 2: Richtend moment berekenen/meten met een uitwendige sensor

Het is ook mogelijk om het richtend moment direct te meten door een extra sensor toe te voegen aan de hangbank. Tussen de boot en het vaste frame.

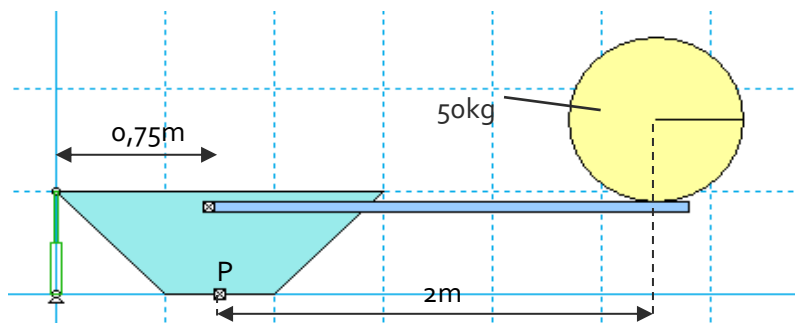
Callewaert et al. (2013) hebben een zeil-ergometer ontwikkeld. Hiervoor is het essentieel om inzicht te krijgen in het richtend moment omdat het gesimuleerd moet worden. Dit is gedaan door een dek van een Laser zeilboot op twee rollagers te plaatsen.

Deze lagers zijn gepositioneerd in de ξ -as. Dit creëert een draaipunt waar het momentencentrum zich in bevindt en maakt het mogelijk een moment te meten rondom dat punt. Aan de stuurboordzijde, de zijde waar de zeiler zich in het voorbeeld niet bevindt, is een dynamometer geplaatst om de kracht te meten. Aangezien de positie van de kracht bekend is, kan daarmee het richtend moment rondom de ξ -as in kaart gebracht worden (afbeelding 11).



Afbeelding 11: Schematische weergave van de opstelling van Callewaert et al. De sensor is geplaatst tussen het dek van de zeilboot en de grond. Het draaipunt zit in de ξ -as.

Om de opstelling uit Callewaert et al. te testen en te kijken of dit een realistische meetopstelling is, is er een model gebouwd in Interactive Physics (afbeelding 12). Dit is een vereenvoudigd model wat bestaat uit een achteraanzicht van een Laser. De mast, het zeil en het roer zijn niet toegevoegd aan het model omdat deze zich in dezelfde verticale lijn van het momentencentrum bevinden. De zwaartekracht op deze onderdelen genereert bij deze situatie geen moment rondom het momentencentrum. Er is een plank aan de Laser bevestigd waar een gewicht op kan worden gelegd, dit stelt de zeiler voor die buiten de boot hangt. De opstelling ziet er als volgt uit:



Afbeelding 12: De hangbank wordt aan de ene zijde voorzien van een arm (2 meter) en een massa (50 kilo), waarbij de hangbank in evenwicht wordt gehouden door een actuator.

In het midden, onderaan de boot is een draaipunt P gecreëerd. Hierover is het mogelijk het moment te meten. De bal representeert de zeiler. Aan de bakboordzijde tussen de boot en de buitenwereld is een actuator geplaatst. Deze is ingesteld zodat deze een vaste lengte heeft van 0,5m.

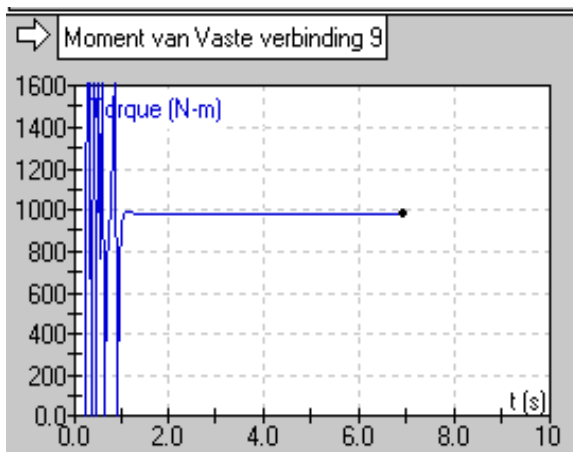
De proef wordt tweemaal uitgevoerd:

1. Punt P is een vaste verbinding. De actuator is buiten beschouwing gelaten. In dit geval levert het vaste punt P het tegenmoment.

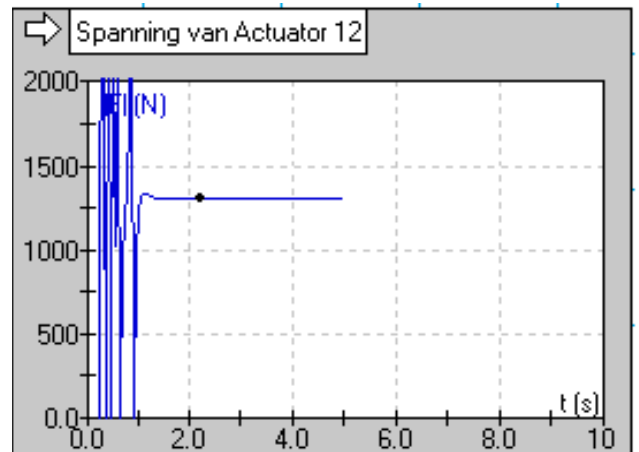
Als de situatie wordt afgespeeld zonder de actuator is er een tegenmoment van ongeveer 981Nm in punt P aanwezig (afbeelding 13). Het tegenmoment in punt P zorgt er in de statische situatie voor dat de boot in evenwicht blijft. De bal veroorzaakt dus een moment van -981Nm .

2. Hierbij is punt P vervangen door een scharnierverbinding. De actuator is toegevoegd en levert hierbij het tegenmoment. In plaats van punt P.

De kracht die de actuator levert is ongeveer 1308N (afbeelding 14). De kracht, maal de arm van $0,75\text{m}$ betekent dat het moment 981Nm is. Hiermee is aangetoond dat met deze opstelling theoretisch gezien de kracht in de actuator, samen met de arm, gebruikt kunnen worden om het richtend moment te berekenen.



Afbeelding 13: Het moment in punt P is 981 Nm .



Afbeelding 14: De spanning over de actuator met P als scharnier is 1308N . De kracht in de actuator maal de arm geeft 981Nm .

Deze opstelling heeft de volgende voor-en nadelen:

Voordelen:

- Er is één omrekenstap nodig om het moment te berekenen.
- Het moment kan gemeten worden met één sensor.

Nadelen:

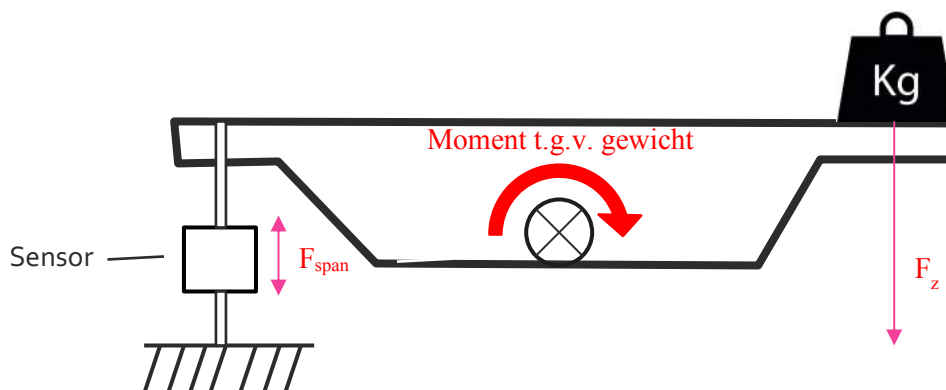
- Er moet een extra sensor geïmplementeerd worden in de hangbank.

2.2.3 Conclusie meetopstelling

Het richtend moment moet in *real-time* weergegeven worden (zie hoofdstuk 1.2, doelstelling).

Wanneer de huidige opstelling gebruikt wordt voor het berekenen van het richtend moment, moet er een nieuwe sensor aangeschaft worden die in x , y en z richting kan meten. Voor deze sensoren is maar beperkte informatie online te vinden over de kosten. Waar de kosten wel gegeven zijn varieert de prijs tussen €420-€1500 (Alibaba Group, 2018). Daarnaast moet er een nieuw programma geschreven worden wat continu de krachten uit zowel de driedimensionale sensor als de forceplate omrekent en vervolgens het richtend moment berekent. Het programmeren hiervan kost veel tijd aangezien dit naast het schrijven ervan ook geïmplementeerd moet worden in de huidige programmatuur van de hangbank.

Wanneer er een uitwendige sensor toegepast wordt is er een één-dimensionale treksensor nodig en een draaipunt om het moment te meten (afbeelding 15). Vervolgens kan het moment berekend worden met deze gemeten kracht en de vaste momentarm. Dit vereist minder handelingen en omrekeningen dan de bovenstaande optie.



Afbeelding 15: Meetopstelling met een draaipunt en een treksensor.

Vanuit het Sailing Innovation Centre is aangegeven dat de voorkeur uit gaat naar een meetopstelling met zo min mogelijk berekeningen en omrekeningen. In overleg is het besluit genomen (met een terugblik op randvoorwaarde 4) om optie 2: *Richtend moment berekenen/meten met een uitwendige sensor*, toe te passen.

Daarmee wordt de volgende eis gesteld aan de hangbank:

E3	De hangbank moet uitgerust worden met een draaipunt in de ξ -as.
----	--

En wordt de volgende eis gesteld aan de meetopstelling:

E4	Er moet een krachtmeter tussen de boot en de buitenwereld bevestigd worden.
----	---

Uit het IP-model kan na observatie van de piekkrachten in de actuator de volgende eis gesteld worden aan de treksensor:

E5	De krachtmeter moet piekkrachten van 3000N kunnen weerstaan.
----	--

2.3 Marktonderzoek

Nu de meetopstelling bekend is, is de volgende stap om te onderzoeken welke sensoren geschikt zijn om in deze opstelling te verwerken. Hierbij is er uitsluitend gekeken naar sensoren die trekkrachten kunnen meten.

2.3.1 Tension/compression disk

Span- of compressieschijven (*afbeelding 16*) kunnen zowel trek- als drukkkrachten meten. Deze worden veelal gebruikt in weegschalen van vrachtwagens, spoorwogen, hijskranen et cetera. Dit maakt wel dat de modellen met de laagste capaciteit al een capaciteit van 7,5 ton hebben. Daarmee is bij deze sensor, wanneer de nul balans wordt meegerekend, de minimale afwijking al 75kg. Voor de datasheet, zie bijlage IV.



Afbeelding 16: Span/compressieschijf.

2.3.2 S-Beam load cell

Een andere mogelijkheid om de trekkracht te meten is door een *S-Beam load cell* te gebruiken (*afbeelding 17*). De sensor meet aan de hand van de buiging van de S- vorm hoeveel kracht er op de sensor werkt.

Het voordeel van de *S-Beam load cell* is dat de sensoren in veel uitvoeringen beschikbaar zijn. Een model van 500kg zou voldoen aan *eis 5*. Het voordeel van *S-beam load cells* is dat deze zeer betrouwbaar en valide zijn (maximale afwijkingen: nul balans = 5kg, non linearity = 0,1kg, hysteresis = 0,1kg). Zie bijlage IV voor de datasheet.



Afbeelding 17: S-Beam load cell.

2.3.3 Stensit load sensing pin

Als laatste is een optie de *Stensit load sensing pin* (*afbeelding 18*). De *Stensit Load sensing pin* is evenals de S-Beam een treksensor. De sensor heeft een capaciteit van 1800N. Deze sensoren zijn minder betrouwbaar dan S-beam sensoren (maximale afwijkingen: nul balans = 18kg, non linearity = 57,96kg, hysteresis = 5,76kg)



Afbeelding 18: Stensit load sensing pin.

2.3.4 Conclusie

Uit het marktonderzoek kan geconcludeerd worden dat een S-beam Load Cell de beste keuze is. De reden hiervoor is de nauwkeurigheid en betrouwbaarheid.

Er is echter in overleg met de opdrachtgever besloten om de *Stensit load sensing pin* te gebruiken. Het Sailing Innovation Centre is al in het bezit van deze sensor. Om te voldoen aan *randvoorwaarde 4* is de opdracht gegeven om de bovengenoemde *Stensit load sensing pin* te gebruiken.

E6	Voor de meetopstelling moet er gebruik gemaakt worden van een Stensit load sensing pin.
----	---

3. Programma van eisen en wensen

Randvoorwaarden

R1	De hangbank moet inzicht geven in het <i>richtend moment</i> en dit op een scherm weergeven.
R2	De functie van de forceplate van de hangbank moet gewaarborgd blijven.
R3	Ruimte is beperkt, de hangbank moet op dezelfde plaats kunnen blijven staan en aanpassingen moeten dit toelaten.
R4	Er is geen budget beschikbaar voor aanpassingen aan de hangbank.

Eisen:

E1	De meetopstelling moet valide waardes geven, de afwijking mag maximaal 5% zijn.
E2	Een persoon moet aan beide zijden van de hangbank het moment kunnen meten.
E3	De hangbank moet uitgerust worden met een draaipunt in de ξ -as.
E4	Er moet een krachtmeter tussen de boot en de buitenwereld bevestigd worden.
E5	De krachtmeter moet piekkrachten van 3000N kunnen weerstaan.
E6	Voor de meetopstelling moet er gebruik gemaakt worden van een Stensit load sensing pin.

Wensen

W1	Het systeem moet een 'Plug and Play' systeem worden. Een zeiler moet zelf metingen kunnen uitvoeren.
----	--

4. Sensor validatie

De Stensit Load sensing pin is in een proefopstelling gevalideerd om te onderzoeken of deze voldoet aan *eis 1*.

4.1 Stensit Load Sensing pin

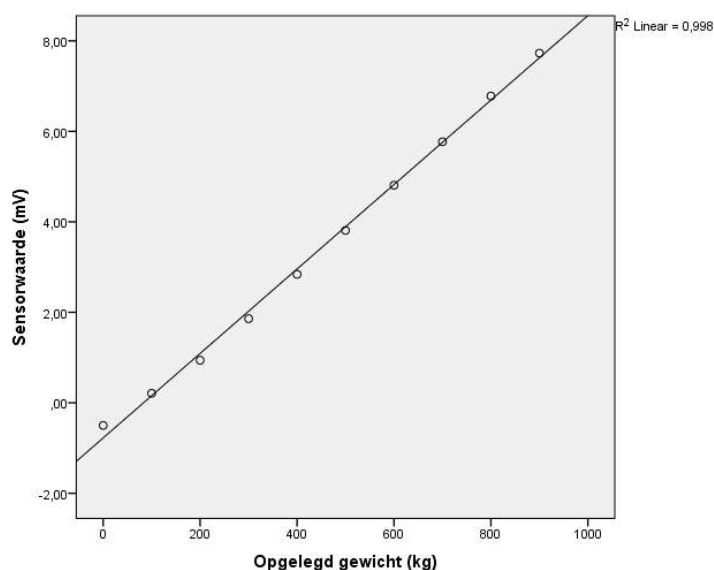
De validatie is als volgt gedaan: De sensor is ingeklemd in een pers waarbij er een oplopende kracht op is gezet (*afbeelding 19*). Met stappen van *100kg* gaat deze kracht oplopend naar *900kg* (50% totale capaciteit). Hierbij is het uitgangssignaal genoteerd.

Wanneer het opgelegde gewicht (kg) uitgezet wordt tegen de uitgelezen sensorwaarde (mV) valt op dat deze niet in (0,0) begint en niet netjes diagonaal oploopt (*afbeelding 20*). Voor de volledige resultaten van de meting, zie bijlage V.

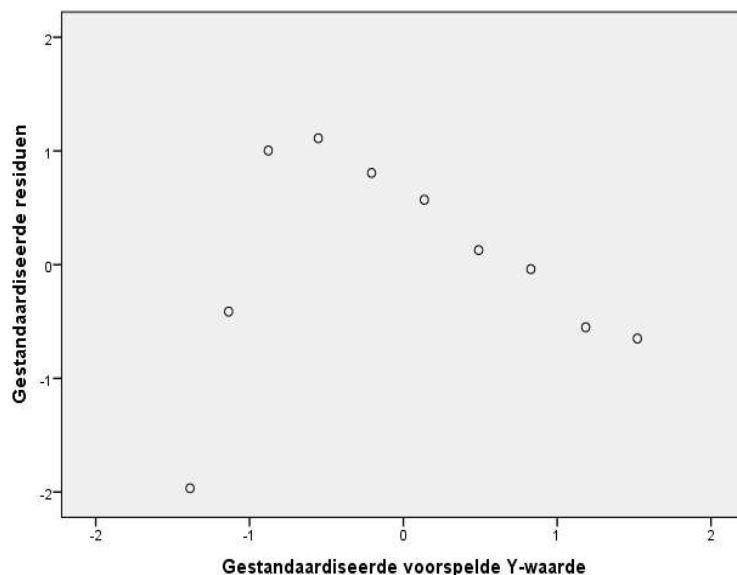
De nul balans van de sensor is -0,50mV (-56,18kg). Wanneer er naar de residuen wordt gekeken kan hieruit geconcludeerd worden dat de variantie niet constant is (*afbeelding 21*). Er zit dus een meetfout in die niet willekeurig is.



Afbeelding 19: Stensit load sensing pin (aangegeven met de rode pijl) ingeklemd in een hydraulische pers.

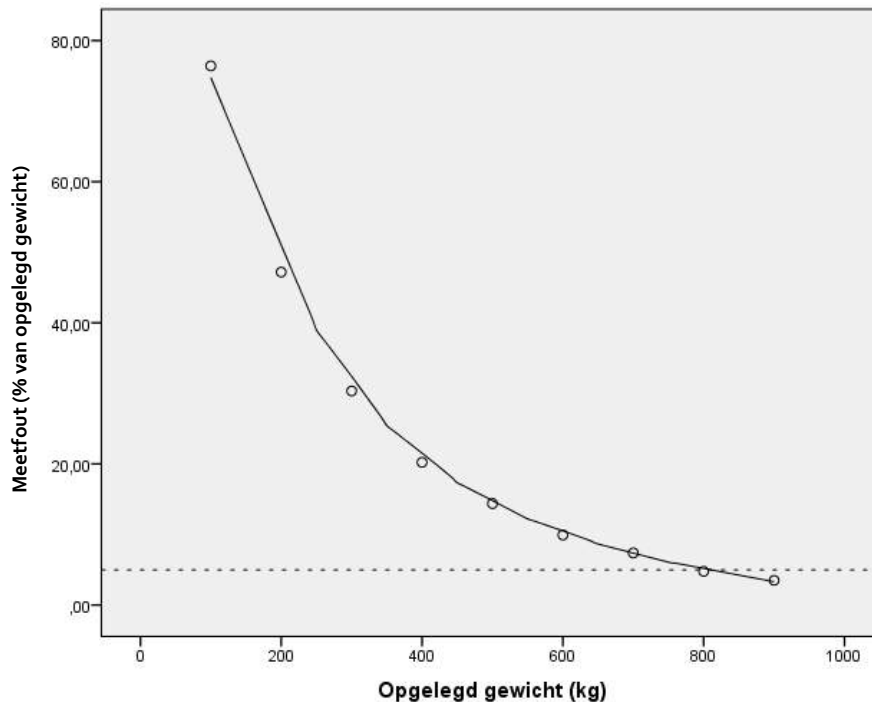


Afbeelding 20: Opgelegde gewicht (kg) uitgezet tegen de gemeten sensorwaarde (mV).



Afbeelding 21: Variantie van de residuen is niet constant. Het is geen mooie 'volk'.

Als de meetfout (gemeten gewicht in % t.o.v. opgelegd gewicht) uitgezet wordt tegen het opgelegde gewicht is goed te zien dat de meetfout bij een groot deel van de relatief lage gewichten (gewicht < 300kg) extreem groot is (meetfout > 30%). Pas bij gewichten boven de 800kg neigt de meetfout onder de 5% te komen (*afbeelding 22*).



Afbeelding 22: Meetfout (gemeten gewicht in % van opgelegd gewicht) uitgezet tegen het opgelegde gewicht. De stippellijn is de grens voor de meetfout (5%).

Daarmee kan geconcludeerd worden dat deze sensor niet voldoet aan *eis 1* en geen geschikte sensor is voor de beoogde meetopstelling. Indien deze sensor wel gebruikt zou worden moet de momentarm ofwel van de zeiler aanzienlijk groter worden, of de momentarm van de sensor aanzienlijk kleiner worden (bij een zeiler van 80kg die met zijn/haar volle gewicht op het dek zit zou dit resulteren in een maximale momentarm van 4,5cm bij de sensor). Daarmee zou het aangrijpingspunt zich ter hoogte van de kuip bij de hangbank bevinden en deze kan geen kracht van 800kg dragen.

Met een nadere terugblik op het marktonderzoek is er toch besloten om een S-beam load cell aan te schaffen. Hierbij is een model met een capaciteit van 500kg voldoende om aan *eis 5* te voldoen.

4.2 S-beam load cell

De S-beam load cell is in een andere opstelling gevalideerd, aangezien dit een treksensor is. Hierbij is de sensor aan een hydraulische haak gehangen waarbij er gewichten oplopend met stappen van 100kg, tot 500kg aan zijn gehangen (afbeelding 23). Hierbij zijn, evenals bij de Stensit load sensing pin de uitgangssignalen genoteerd (zie bijlage V).

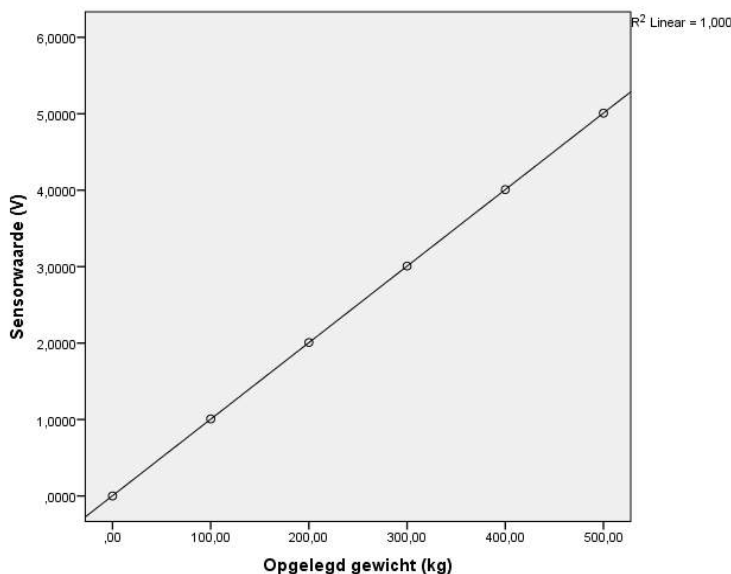
Aan de opstelling is een meetversterker toegevoegd. Zodat de uitgelezen waardes zich zullen uiten in 0-5V. Binnen dit voltage kan een Arduino de input lezen.

Als de sensorwaarde (V) uitgezet wordt tegen het opgelegde gewicht (kg) is te zien dat de lijn begint bij (0,0) en oploopt naar (500,5) (afbeelding 24).

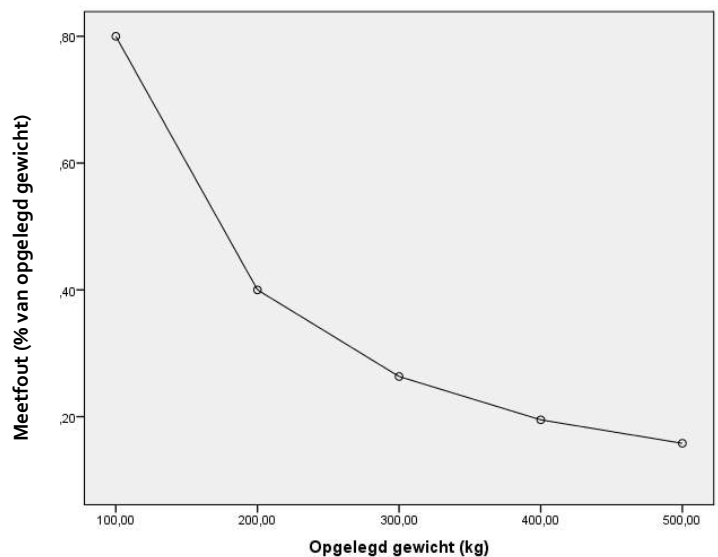
Wanneer de meetfout (gemeten gewicht in % t.o.v. opgelegd gewicht) nader bekeken wordt valt deze tussen 0,1% en 0,8% (afbeelding 25). Hieruit kan geconcludeerd worden dat de S-beam load cell voldoet aan eis 1 en dat de meetfout over het hele meetbereik van de sensor niet groter is dan 0,8%.



Afbeelding 23: Opstelling voor validatie van de S-beam load cell.



Afbeelding 24: Opgelegd gewicht (kg) uitgezet tegen de gemeten sensorwaarde (V).



Afbeelding 25: Meetfout (gemeten gewicht in % t.o.v. opgelegd gewicht) uitgezet tegen opgelegd gewicht (kg).

Heruit kan eis 6 aangepast worden:

E6	Voor de meetopstelling moet er gebruik gemaakt worden van een S-beam load cell.
----	---

5. Meetopstelling

5.1 Draaipunt

De hangbank die in het centrum staat voldoet niet aan alle eisen. *Eis 3* vereist dat er een draaipunt in de hangbank zit.

Het Sailing Innovation Centre is in het bezit van een oude zeilsimulator (*afbeelding 26*). Deze simulator bevat wel een draaipunt en is sterk genoeg om een Laser-zeilboot inclusief zeiler te dagen.

Met oog op *randvoorwaarde 4* en om aan *eis 3* te voldoen is de opdracht gegeven vanuit het centrum deze simulator te hergebruiken om de meetopstelling voor het richtend moment te kunnen implementeren. Hiervoor zijn aanpassingen gemaakt aan de simulator, voor een overzicht van deze aanpassingen wordt verwezen naar bijlage VI.



Afbeelding 26: De oude zeilsimulator toen deze nog in gebruik was bij de TU-Delft.

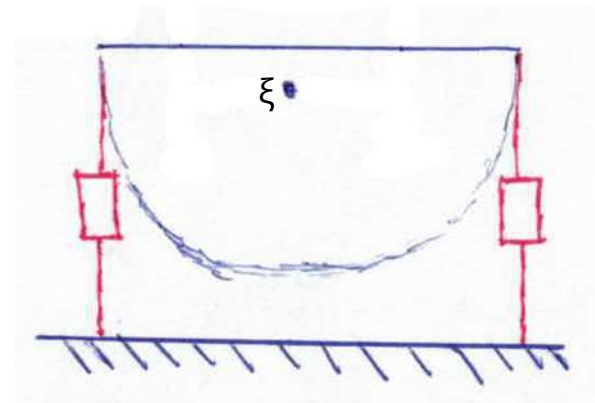
5.2 Sensorverwerking

5.2.1 Eerste meetopstelling

Er is een eerste meetopstelling (*afbeelding 27*) bedacht waarmee het richtend moment gemeten kan worden. De treksensoren zijn opgehangen aan staaldraad en vervolgens vastgemaakt aan het frame en de boot.

Hierbij is rekening er gehouden met *eis 2* en *4*:

- Aan beide zijden van de hangbank kan gemeten worden.
- Er zit een krachtmeter tussen de boot en de buitenwereld.



Afbeelding 27: in de eerste meetopstelling is te zien dat er aan beide zijde van de boot een sensoren hangen.

Dit vereist dat er twee sensoren zijn om te voldoen aan *eis 2*.

Dit idee is voorgelegd en verworpen vanwege de volgende reden: Deze opstelling geeft twee output signalen. Dat betekent dat er twee output signalen verwerkt moeten worden in de bestaande programmatuur. De opdrachtgever stelt dat het richtend moment het liefst uitgedrukt moet worden in één output signaal.

Een nieuwe eis kan hiermee gesteld worden:

E2.1	Het richtend moment van beide zijde moet uitgedrukt worden in één output signaal
------	--

5.2.2 Proefopstellingen tweede meetopstelling

Om wel te voldoen aan eis 2.1 zijn er drie meetopstellingen bedacht:

Meetopstelling 1:

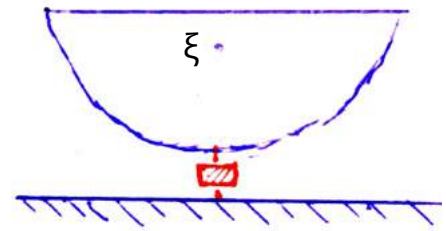
De sensor is ingeklemd tussen de bodem van de hangbank en het frame waar deze in opgehangen is (afbeelding 28). De sensor zal bij deze meetopstelling, indien er *geen* rek aanwezig is in de verbinding, ervoor zorgen dat de hangbank niet te veel kan draaien.

Voordelen:

- Eenvoudig te bevestigen.
- De persoon kan aan twee kanten het moment meten zonder extra handelingen.

Nadelen:

- Een uitbreiding is vereist aan de onderkant van de hangbank om de sensor aan te kunnen bevestigen.
- Afhankelijk van rek in het draad zal de momentarm variëren. Dit moet meegerekend worden bij het berekenen van het richtend moment.
- De hangbank zal licht kantelen. Dit is niet gewenst bij het trainen.



Afbeelding 28: De sensor is aan het frame en de onderkant van de boot bevestigd. De sensor richt zich naar de positie van de kracht.

Meetopstelling 2:

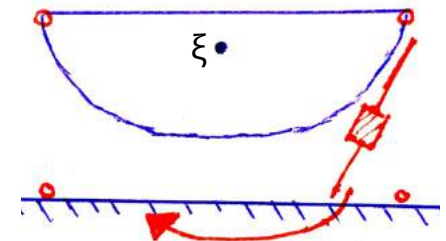
Hier is aan één zijde van het systeem een sensor verwerkt (afbeelding 29). De sensor kan eenvoudig verplaatst worden van de ene zijde naar de andere zijde. Hierdoor kan aan beide zijden gehangen worden met maar één sensor.

Voordelen:

- Aan beide zeiden kan gehangen worden.
- Eenvoudige constructie.
- De hangbank zal niet kantelen.

Nadelen:

- Als de persoon aan de andere kant wilt hangen moet deze persoon eerst uit de boot om de sensor aan de andere kant te hangen.



Afbeelding 29: Het frame en de boot zijn uitgerust met ogen. Hierdoor kan de sensor eenvoudig van de ene kant naar de andere kant verplaatst worden.

Meetopstelling 3:

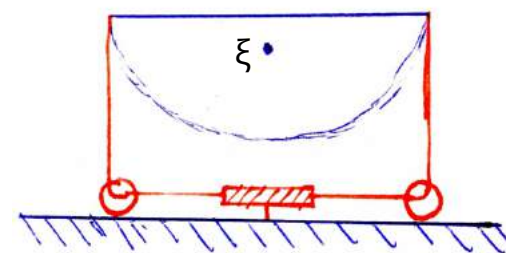
Hier wordt met één sensor gemeten en kan aan beide kanten het moment gemeten worden (afbeelding 30). Aan beide zijden is staaldraad bevestigd wat via katrollen naar de sensor loopt. De sensor zit aan het frame bevestigd.

Voordelen:

- De persoon kan aan twee kanten het moment meten zonder extra handelingen.
- De arm is eenvoudig te bepalen omdat deze evenwijdig aan de grond staat.
- De hangbank zal niet kantelen.

Nadelen:

- Er zullen katrollen aangeschaft moeten worden.
- Ingewikkeldere constructie.



Afbeelding 30: De sensor is in het midden van het frame bevestigd. Aan de zijkant van de boot zal staaldraad via katrollen naar het aluminium lopen.

5.3 Definitieve meetopstelling

Meetopstelling 1 voldoet aan alle gestelde eisen met betrekking tot de meetopstelling. De sensor voldoet hierbij niet aan *eis 5* aangezien de momentarm relatief klein is. Daarmee wordt de kracht op de sensor groter en kan boven 500kg uitkomen.

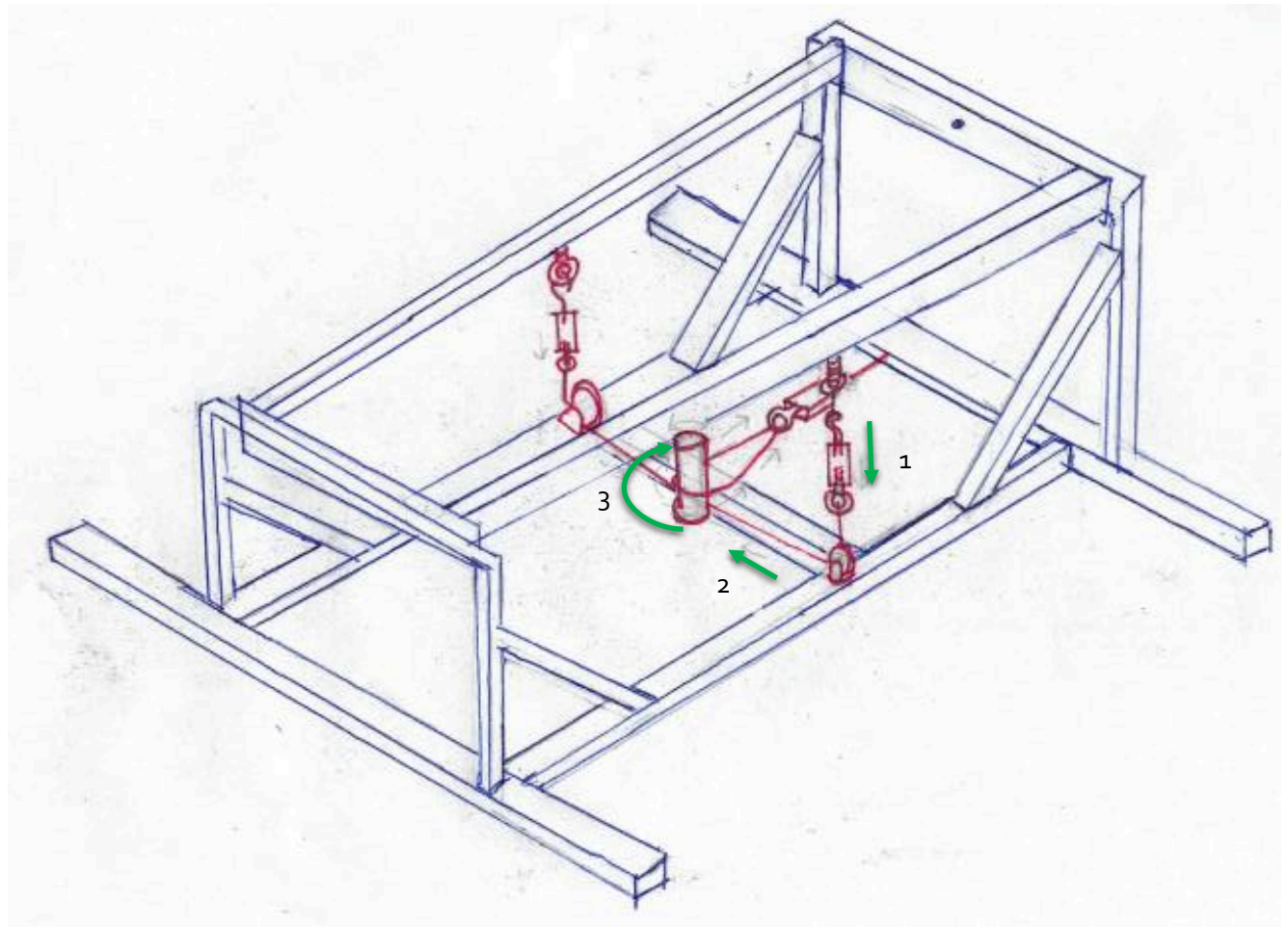
Meetopstelling 2 voldoet ook aan alle gestelde eisen. Deze opstelling voldoet niet aan *wens 1*.

Meetopstelling 3 voldoet aan alle gestelde eisen met betrekking tot de meetopstelling. Ook voldoet deze meetopstelling aan *wens 1*. De keuze is gemaakt om dit concept uit te werken.

In de definitieve meetopstelling kan er aan beide zijdes gehangen worden en het moment gemeten worden. Hiermee voldoet de opstelling aan *eis 2*, *eis 2.1*, *eis 4* en *eis 6*. Ook voldoet het aan *wens 1*. Er is wel een aanpassing aan het ontwerp gemaakt. Meetopstelling 3 vereist dat er katrollen aangeschaft moeten worden. De opdracht is gegeven om hiervoor een andere oplossing te bedenken. Dit is opgelost door een as te hergebruiken die in de zeilsimulator verwerkt zat.

De werking van de definitieve meetopstelling is als volgt (*afbeelding 31*):

Aan beide zijdes is een schroefoog in het frame gedraaid. Via een spanhaak (1) loopt het staaldraad door naar een katrol. Via de katrol wordt het staaldraad doorgeleid naar een as aan de binnenzijde (2). Daarna loopt het staaldraad door naar de treksensor (3). De treksensor zit met staaldraadklemmen bevestigd aan het frame en vormt de connectie tussen de boot en de 'buitenwereld'.



Afbeelding 31: Definitieve meetopstelling.

6. Het realiseren van de meetopstelling

6.1 Benodigheden

Niet alle spullen voor het realiseren van de meetopstelling zijn aanwezig in het centrum. Een aantal materialen en onderdelen zijn daarom aangeschaft:

- Staaldraad (6 meter)
- Staaldraadklemmen (8x)
- M12 schroefvoeg (2x)

6.2 Implementatie

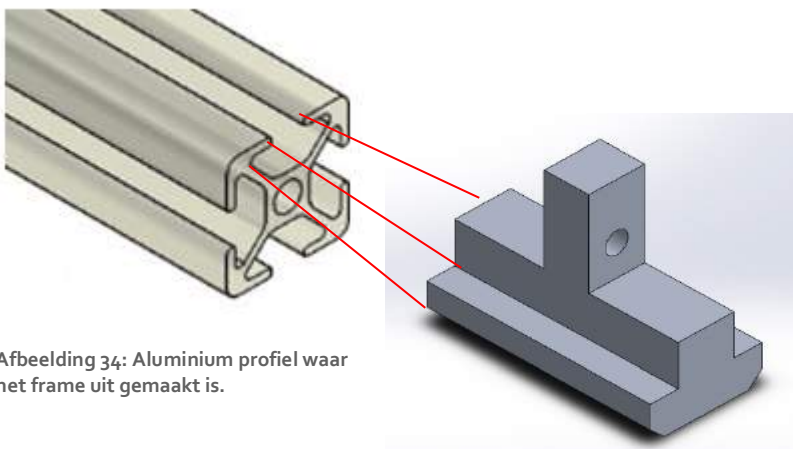
Op afbeelding 32 is te zien hoe het staaldraad bevestigd is. De katrollen staan loodrecht onder de bevestiging aan de hangbank. De katrollen zijn bevestigd met een speciaal ontworpen blok. Dit blok is eenvoudig in het aluminium te schuiven (afbeelding 33 & 34). Voor technische aspecten van het aluminium waar de hangbank uit bestaat wordt er verwezen naar bijlage VII.

Het blok is ontworpen zodat de katrol toegevoegd kan worden aan de meetopstelling. Hierbij moet het aluminium blok voldoen aan *eis 5*. Om dit te controleren is een simulatie gedaan in SolidWorks (afbeelding 35).

Uit de simulatie blijkt dat het blok voldoet aan *eis 5*. De Von Mises spanning bereikt geen gevaarlijk niveau. Van blijvende vervorming of gevaar voor breken is geen sprake. Een volledige rapportage van de simulatie is te vinden in bijlage VIII.

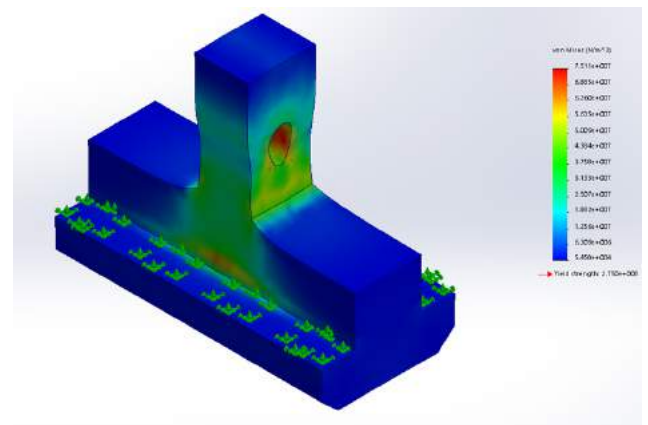


Afbeelding 32: Bevestiging van het staaldraad aan de boot en de sensor.



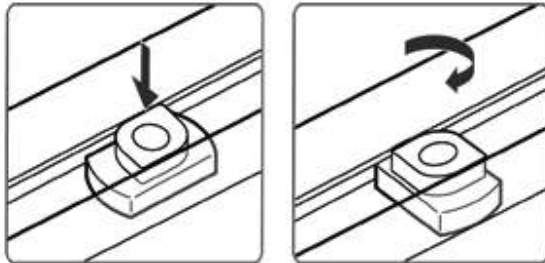
Afbeelding 34: Aluminium profiel waar het frame uit gemaakt is.

Afbeelding 33: Bevestigingsblok voor de katrollen.



Afbeelding 35: Resultaten van de simulatie in SolidWorks.

De as waar het staaldraad omheen loopt om de sensor te bereiken is gebruikt uit de zeilsimulator (afbeelding 36). Deze is met hamermoeren bevestigd op het aluminium (afbeelding 37).



Afbeelding 36: T-slot hamermoer.



Afbeelding 37: As afkomstig uit de zeilsimulator.

6.3 Sensor signaalverwerking

De S-beam load cell is aangesloten aan een meetversterker (bijlage II). Deze meetversterker is zo geprogrammeerd dat deze bij 0 kg een voltage geeft van 0V en bij 500kg een voltage geeft van 5V. Dit zijn de maximale waarden waar de analoge input van een Arduino mee kan werken. De meetopstelling moet geïntegreerd worden in de bestaande programmatuur en elektronica (bijlage I). De Arduino is geprogrammeerd om het ingangssignaal om te rekenen naar het richtend moment. Voor de volledige code, zie bijlage IX.

7. Testfase

7.1 Testprotocol

Na het aanpassen van de hangbank is de volgende stap om te onderzoeken of deze ook voldoet aan de gestelde *eis 1* met betrekking tot validiteit. Het gemeten moment mag maximaal 5% afwijken.

7.1.1 Benodigdheden

De volgende spullen zijn nodig voor het testen:

- Hangbank
- Arduino
- Meetversterker (Rinstrum 1101)
- Gewichten 10kg (10x)
- Houten plank (min. 2m lang)
- Laptop (Arduino software)
- Meetlint

7.1.2 Opstelling

De hangbank zal getest worden door een bekend moment uit te oefenen aan één zijde en vervolgens te noteren of de hangbank dezelfde waarde aan de tegenovergestelde zijde waarneemt. Er zal een bekend moment uitgeoefend worden met behulp van een balk. Deze balk wordt op het dek neergelegd en onder de hangband opgehangen (afbeelding 38). Dit maakt het mogelijk op de balk gewichten te plaatsen op een bekende afstand.

Het gewicht zal op de balk geplaatst worden op een afstand van 1 meter, zodat deze ook een momentarm heeft van 1 meter. Daarmee is de te verwachte waarde uit de sensor gelijk aan de hoeveelheid van het gewicht wat op de balk geplaatst wordt. Vergelijking (2) wordt daarmee toegepast:

$$\sum M = 0 \quad \text{dus} \quad M_H = M_R \quad (2)$$

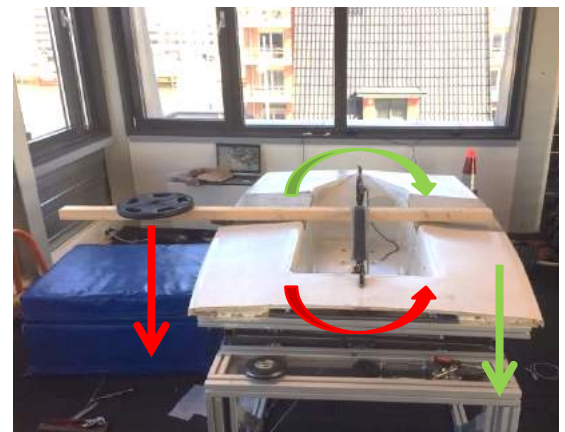
M_H wordt veroorzaakt door het opgelegde gewicht. Hier zal naar verwezen worden met M_H .

M_R is het richtend moment. Deze komt uit de sensor en tegengesteld gericht tegen M_H .

7.1.2. Methode

De spanhaken aan de zijkanten worden aangedraaid zodat de hangbank in een neutrale positie staat en niet geroteerd. Daarnaast wordt er rekening mee gehouden dat er nog geen extra spanning op de sensor staat, behalve mogelijk het gewicht van de kabels. Bij het testen van de hangbank worden deze waardes buiten beschouwing gelaten.

Vervolgens zal er een startgewicht van 10kg op de balk gelegd worden. Zodra de sensor een stabiele waarde geeft wordt deze genoteerd en wordt er weer 10kg toegevoegd. Dit proces wordt herhaald tot er een gewicht van 100kg op de balk ligt. Vervolgens wordt het gewicht per 10kg van de bank afgehaald. Ook deze waardes worden genoteerd. Om zo te kijken of veranderingen in het moment zowel oplopend als aflopend waarneembaar en nauwkeurig zijn.



Afbeelding 38: Opstelling testfase. M_H gegeven in rood en M_R gegeven in groen.

Om de betrouwbaarheid te testen wordt dit proces drie keer uitgevoerd zodat er ook rekening gehouden kan worden met factoren zoals het uitrekken van het staalraad, of eventuele kruip of minimale verschuivingen in het materiaal.

7.1.3 Statistiek

Met het programma *IBM SPSS Statistics* worden de betrouwbaarheid en validiteit vastgesteld.

De betrouwbaarheid van de hangbank wordt bepaald door middel van de ICC-waarde (*intraclass correlation coefficient*). Hierbij wordt alle gemeten data onderzocht en worden metingen 1, 2 en 3 met elkaar vergeleken.

Om te onderzoeken of de hangbank valide waardes geeft zal het moment M_R uitgezet worden tegen M_H . Vervolgens wordt de correlatiecoëfficiënt (*Pearson's r*) berekend. Als laatste stap zal met een enkelvoudig lineair regressiemodel onderzocht worden of M_H te voorspellen is aan de hand van M_R .

7.2 Resultaten

De resultaten zijn voor het oplopende moment als volgt:

Tabel 1: Resultaten van de test bij een oplopend moment (0-100kg)

Opgelegde moment M_H (kgm)	Gemeten moment M_R (kgm)		
	Test 1	Test 2	Test 3
10 kgm	10,26	10,36	10,26
20 kgm	19,17	19,57	20,52
30 kgm	30,24	30,24	29,84
40 kgm	38,47	38,20	39,01
50 kgm	47,38	49,01	48,20
60 kgm	57,38	58,59	57,11
70 kgm	67,37	67,63	65,75
80 kgm	74,25	77,72	75,39
90 kgm	85,05	84,11	84,65
100 kgm	91,07	93,28	92,93

En voor het aflopende moment:

Tabel 2: Resultaten van de test bij een aflopend moment (100-0kg)

Opgelegde moment M_H (kgm)	Gemeten moment M_R (kgm)		
	Test 1	Test 2	Test 3
100 kgm	91,07	10,18	10,43
90 kgm	90,31	20,23	20,43
80 kgm	89,51	30,04	30,58
70 kgm	87,04	38,74	39,01
60 kgm	82,00	47,80	48,02
50 kgm	73,13	57,59	57,20
40 kgm	61,43	66,11	67,25
30 kgm	51,17	76,83	75,82
20 kgm	35,37	84,54	83,91
10 kgm	19,30	90,84	93,47

8. Evaluatiefase

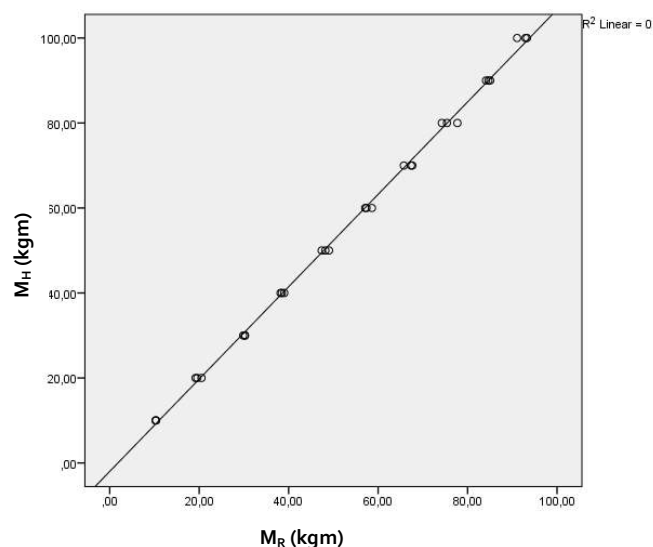
8.1 Statistiek

8.1.1 Betrouwbaarheid

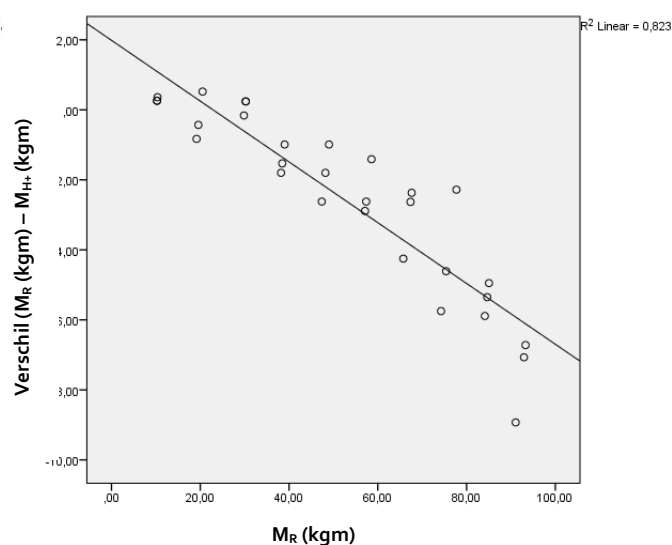
Er kan geconcludeerd worden dat het systeem betrouwbaar is: $1,000 > ICC > 0,999$, $p = 0,000$.

8.1.2 Validiteit

Oplopend moment:



Afbeelding 39: Opgelegd moment M_H uitgezet tegen het gemeten moment M_R . Inclusief regressielijn.



Afbeelding 40: Verschil ($M_R - M_H$) uitgezet tegen het gemeten moment M_R . Inclusief regressielijn.

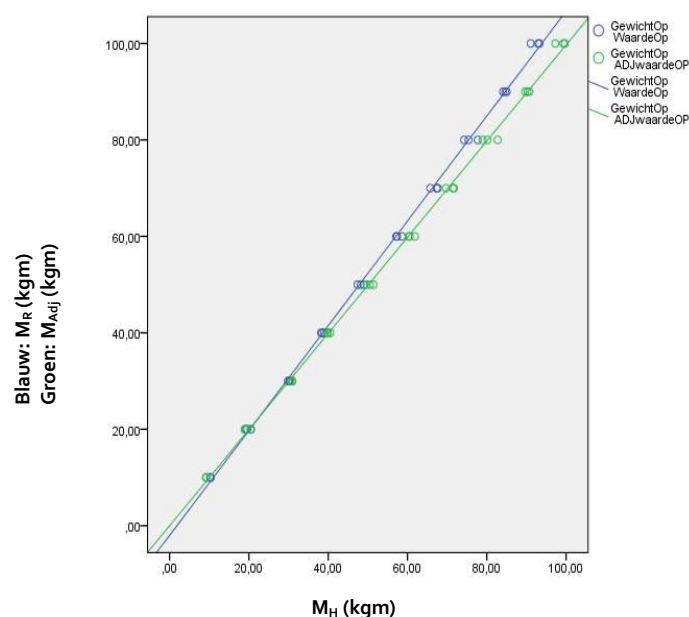
Als eerst is er gekeken naar het moment wanneer deze oploopt (0-100kg). In afbeelding 39 zijn de twee momenten tegen elkaar uitgezet. Hierbij is er een regressielijn toegevoegd ($y = 1,99 + 1,09x$). Er is een significante correlatie tussen M_H en M_R (Pearson $r = 0,999$, $p < 0,001$).

In afbeelding 40 is het verschil ($M_R - M_H$) tussen de twee momenten uitgezet tegen M_R . Daaruit is te observeren dat de meetfout toeneemt naarmate het moment groter wordt. Dit wordt bevestigd door de regressielijn ($y = 1,99 - 0,09x$, $rc < 0$).

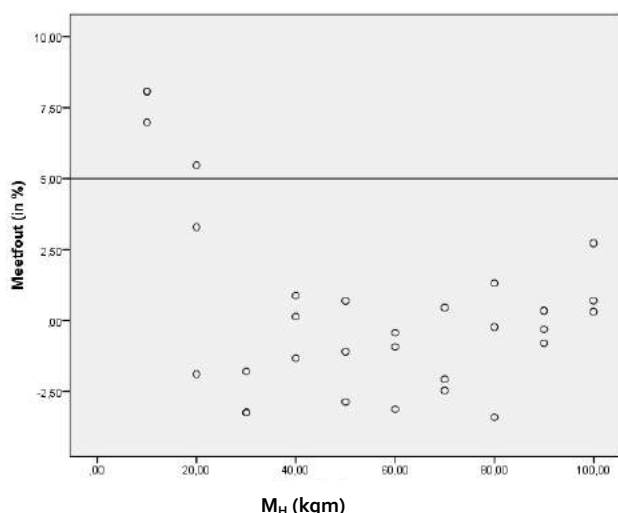
Er kan geobserveerd worden dat de meetfout lineair toeneemt met M_R . In dit geval is een model voor het voorspellen van M_H als volgt:

$$M_{Adj} = M_R - (1,99 + 1,09 * M_R) \quad (10)$$

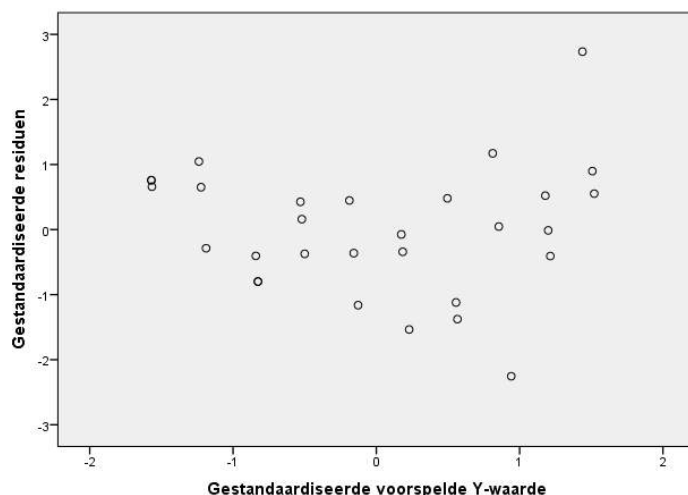
Hierbij wordt de verwachte meetfout afgetrokken van de gemeten waardes. De grafiek in afbeelding 41 laat zien dat het voorspelde moment (M_{Adj}) inderdaad meer neigt naar (0,0) en (100,100).



Afbeelding 41: Gemeten moment M_R (blauw) en voorspelde moment M_{Adj} (groen) uitgezet tegen het opgelegde moment M_H .



Afbeelding 42: Foutmarge uitgezet tegen het opgelegde moment M_H .



Afbeelding 43: De variantie van de residuen. Gestandaardiseerde residuen uitgezet tegen de voorspelde y-waarde.

Als er dan gekeken wordt naar de meetfout is er te zien dat na het corrigeren van de gemeten data 3 metingen nog boven de foutmarge van 5% uitkomen (afbeelding 42).

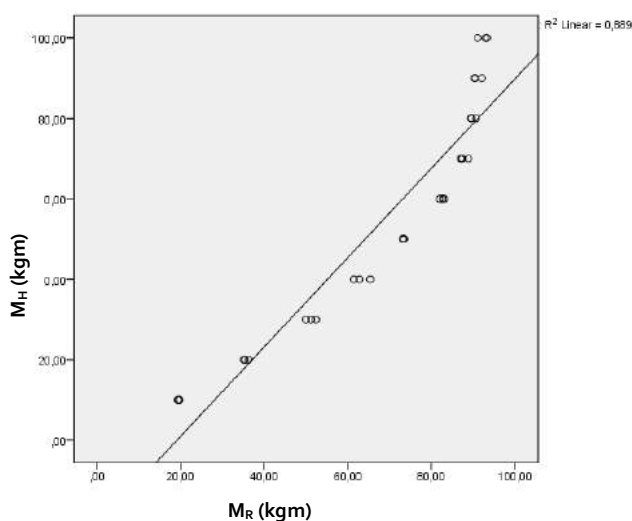
De variantie van het verschil ($M_R - M_H$) is na correctie constant (afbeelding 43). Daarmee is het niet mogelijk een tweede correctie op de gemeten data uit te voeren.

Aflopend moment:

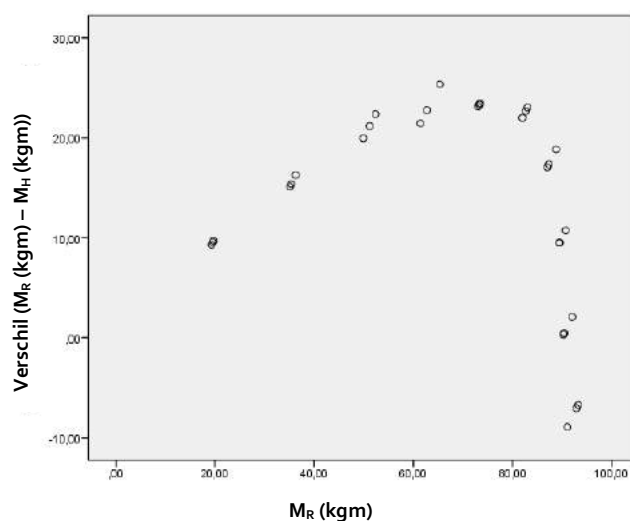
Wanneer het moment afloopt (van 100-0kg) valt gelijk op dat de hangbank bij de hogere gewichten consistent te veel meet (afbeelding 44).

Er is wel een significante correlatie tussen M_R en M_H (Pearson $r = 0,943$, $p < 0,001$).

Als er naar het verschil tussen M_R en M_H wordt gekeken is er geen lineair verband uit te halen (afbeelding 45). De hangbank meet consistent teveel bij een afnemend moment. Daarbij is de meetfout het grootst tussen 60 en 85 kilo (meetfout > 20kg). Aangezien er geen lineair verband uit te halen is kan er geen correctie op de gemeten waardes uitgevoerd worden.



Afbeelding 44: Opgelegd moment M_H uitgezet tegen het gemeten moment M_R .



Afbeelding 45: Verschil ($M_R - M_H$) uitgezet tegen het gemeten moment M_R .

8.1.3 Conclusie

Er kan geconcludeerd worden dat de hangbank een betrouwbaar meetsysteem is ($ICC > 0,999$).

De validiteit voldoet echter niet aan *eis 1* (meetfout $> 5\%$). Er is een duidelijk onderscheid in validiteit wanneer de hangbank een toenemend moment meet en een afnemend moment. Mogelijke verklaringen hiervoor worden verder toegelicht in hoofdstuk 7 - *Discussie*. Wel is het mogelijk een correctie toe te passen (*vergelijking 10 pag.*) op de huidige waardes die de hangbank uitleest. Daarmee is het mogelijk om valide waardes te krijgen en aan *eis 1* te voldoen wanneer het richtend moment groter is dan 20kgm of $196,13\text{Nm}$ en wanneer het moment oploopt.

8.2 Terugblik op de randvoorwaarden, eisen en wensen

Randvoorwaarden:

R1	De hangbank moet inzicht geven in het <i>richtend moment</i> en dit op een scherm weergeven.
R2	De functie van de forceplate van de hangbank moet gewaarborgd blijven.
R3	Ruimte is beperkt, de hangbank moet op dezelfde plaats kunnen blijven staan en aanpassingen moeten dit toelaten.
R4	Er is geen beschikbaar budget voor aanpassingen aan de hangbank

Eisen:		Voldaan?	Opmerkingen
E1	De meetopstelling moet valide krachten geven, de afwijking mag maximaal 5% zijn.	✗	De opstelling voldoet niet aan deze eis. Bij een oplopend moment $< 20\text{kg}$ is de meetfout groter dan 5% . Bij een aflopend moment voldoet de opstelling niet.
E2	Een persoon moet aan beide zijden van de hangbank het moment kunnen meten.	✓	
↳ E2.1	Het richtend moment van beide zijden moet uitgedrukt worden in één output signaal.	✓	
E3	De hangbank moet uitgerust worden met een draaipunt in de ξ -as.	✓	
E4	Er moet een krachtmeter tussen de boot en de buitenwereld bevestigd worden.	✓	
E5	De krachtmeter moet piekkrachten van 3000N kunnen weerstaan.	✓	
E6	Voor de meetopstelling moet er gebruik gemaakt worden van een S-beam load cell.	✓	

Wensen

W1	Het systeem moet een 'Plug and Play' systeem worden. Een zeiler moet zelf metingen kunnen uitvoeren.	✓	
----	--	---	--

9. Discussie

De waarden voor het richtend moment die de hangbank geeft voldoen niet voor 100% aan de maximale meetfout van 5%. Dit kan verklaard worden onder invloed van de volgende factoren:

De staaldraad die in de hangbank toegepast is, is gecoat met een laag zacht plastic/rubber. Dit heeft als voordeel dat het bij kan dragen aan extra grip op de staaldraadklemmen en daarmee een sterkere verbinding vormt. Nu is er geconstateerd dat wanneer de hangbank gedurende een korte periode (periode < 1min) statisch belast wordt door een persoon, de druk van het staaldraad op de katrol zodanig groot wordt dat het buitenlaagje van het staaldraad vervormd. Daarmee is deze niet meer rond en kan daardoor voor extra weerstand zorgen. Een aanbeveling hiervoor is om het staaldraad te vervangen door kaal staaldraad (4mm), zonder plastic/rubberen coating. Hierdoor kan het draad soepel door de katrollen glijden en zal er minder tot geen vervorming op kunnen treden.

De rollagers waaraan de hangbank is opgehangen zijn geen perfecte lagers. Dat wil zeggen; er is weerstand aanwezig doordat de lagers wellicht oud zijn en niet goed meer rollen. Een reden hiervoor is onbekend, aangezien de lagers hergebruikt zijn uit de zeilsimulator. Een oplossing kan zijn om nieuwe lagers aan te schaffen waarvan de initiële weerstand bekend is, of de weerstand van de huidige rollagers vast te stellen. Vervolgens kan deze weerstand meegenomen worden in de berekening van het moment.

Wanneer er een moment op de hangbank wordt uitgeoefend zal deze in huidige toestand altijd een fractie draaien. Er zal altijd wat rek in het staaldraad zitten en het dek buigt altijd lichtelijk door. Daarnaast is er geconstateerd dat het frame waar het dek op rust ook een fractie doorbuigt. Doordat dit een invloed kan hebben op de momentarm kan dit ervoor zorgen dat er een kleiner moment gemeten wordt dan er opgelegd is. Als er een mogelijkheid is deze doorbuiging in kaart te brengen (doorbuiging per kilogram gewicht op het dek) kan hiervoor een correctie op het gemeten moment toegepast worden.

Doordat beide staaldraden samenkomen in het midden en beide om dezelfde as richting de sensor lopen kan het weerstand opleveren als één draad nog voor een deel onder spanning staat terwijl het andere draad onder spanning komt te staan. In een ideale situatie is van het ene draad de spanning al volledig af als het draad aan de andere zijde onder spanning komt te staan. In de praktijk is dit niet het geval. De spanning op de staalkabel aan de zijde waar gehangen wordt komt langzaam van de spanning af en levert dus tot het laatste moment nog een weerstand op de as. Dit kan bijdragen aan het meten van een verkeerd moment. Een oplossing is door de as te vervangen door twee onafhankelijke assen of katrollen, die onafhankelijk van elkaar kunnen bewegen, waarbij de staalkabels alsnog naar dezelfde sensor toe lopen, maar niet door elkaars weerstand beïnvloed worden.

Tot slot zijn factoren zoals wrijving, rolweerstand, gewicht van de staalkabels en gewicht van het dek verwaarloosd bij het berekenen van het richtend moment uit de krachtwaardes van de sensor. Om te onderzoeken of één van deze factoren een significante invloed heeft op het richtend moment zou hiervoor een vervolganalyse nodig zijn.

Alle bovengenoemde factoren kunnen van invloed zijn op het meten van het richtend moment. En kunnen daarmee verklaren waarom de hangbank niet voldoet aan de gestelde eis.

10. Conclusie

Er kan geconcludeerd worden dat er voldaan is aan de gestelde doelstelling; De hangbank moet zo aangepast of uitgebreid worden dat deze in real-time het *richtend moment* weer kan geven. Hiertoe moet er een meetopstelling in de hangbank geïmplementeerd worden.

Een meetopstelling voor het richtend moment is geïmplementeerd aan de bestaande hangbank. Dit vereiste een uitbreiding aan de hangbank, waarbij er een draaipunt toegevoegd is in de ξ -as.

Dankzij de meetopstelling kan het richtend moment aan twee kanten van de boot gemeten worden met één S-beam load cell en kan deze piekkrachten $> 3000\text{N}$ weerstaan. De meetopstelling is gebaseerd op het feit dat er een sensor tussen de boot en de buitenwereld (het frame) bevestigd is. De hangbank is betrouwbaar bij het meten van het richtend moment ($\text{ICC} > 0,999$, $p = 0,000$) maar meet geen valide waarden (meetfout $> 5\%$). Vooral bij een aflopend moment (moment gaat richting 0) is de hangbank erg onnauwkeurig.

Alle functies zijn gewaarborgd gebleven die in de oude hangbank zaten. Ook staat de hangbank op dezelfde plek in de sportschool en is de beperkte ruimte gerespecteerd. Wanneer een zeiler de hangbank wil gebruiken kan deze plaatsnemen en wordt direct het richtend moment weergegeven op een scherm. Het systeem is daarmee *'plug and play'* en voldoet aan deze wens.

Nader onderzoek zal nodig zijn om erachter te komen welke van de genoemde factoren in de discussie van doorslaggevende invloed zijn op de validiteit van het systeem.

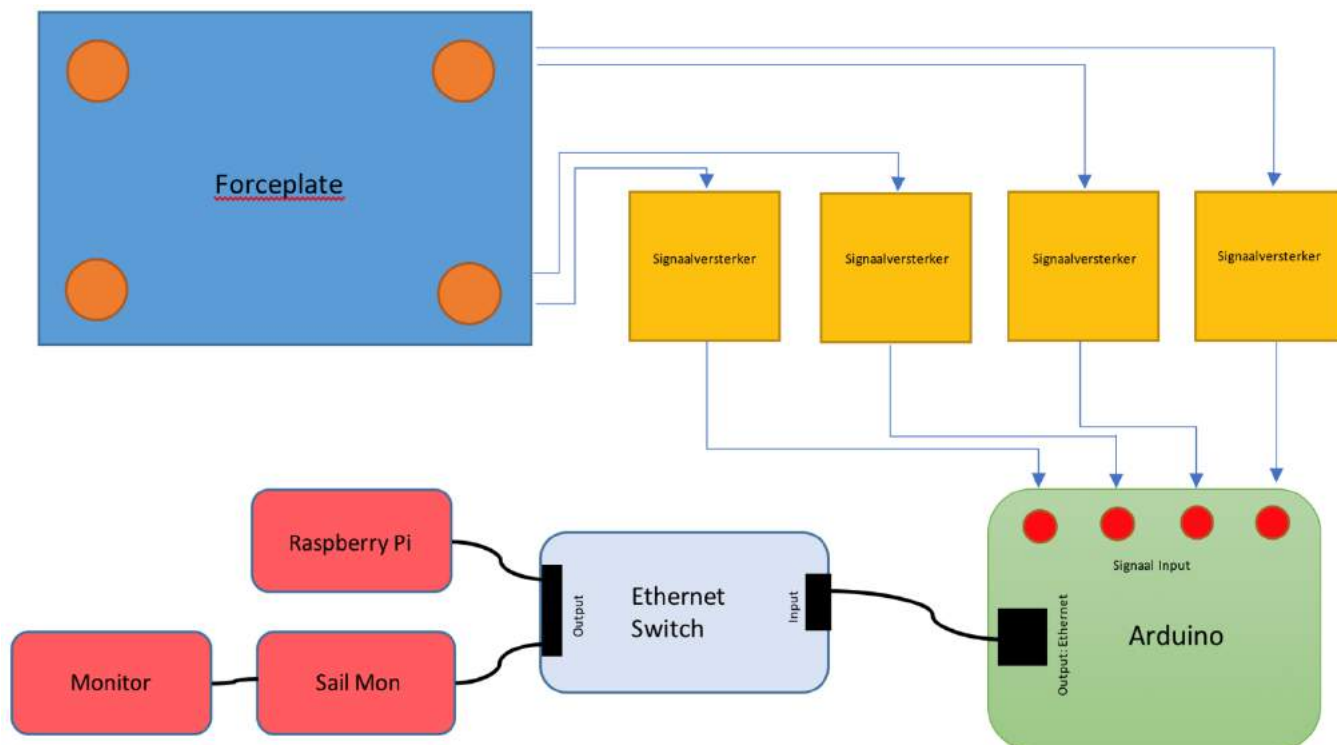
Bibliografie

- Alibaba Group. (2018). *Multi axial load sensor*. Retrieved from <https://www.alibaba.com/>
- Alibaba Group. (2018). *Professional manufacture dynamic multi axis force transducer ,Multi-Axis Sensor*. Retrieved from <https://www.alibaba.com/>
- Alibaba Group. (2018). *S Type Alloy Steel Weighting Sensor 500kg Beam Load Cell* . Retrieved from AliExpress: <https://nl.aliexpress.com>
- Alibaba Group. (2018). *Tension load cell 500/1000/2000kg force sensor*. Retrieved from AliExpress: <https://nl.aliexpress.com>
- Broekens, D. (2018, januari 16). Kennismaking Sailing Innovation Centre, monderlinge communicatie. (D. L. Kersing, & M. Bremmers, Interviewers)
- Callewaert, M., Geerts, S., Lataire, E., Boone, J., Vantorre, M., & Bourgois, J. (2013). Development of an Upwind Sailing Ergometer. *International journal of sports, physiology and performance*, 663-670.
- Marchaj, C. (1988). *Aero-hydrodynamics of sailing*. Frome: Butler & Tanner Ltd.
- Michalak, J. (2012, oktober 1). *Figuring Sail Area 1*. Retrieved from Jim Michalak's Boat Designs: <http://www.jimsboats.com/webarchives/2012/10oct12.htm>
- Mini staaldr. blok met sluiting. (2018). Retrieved from Belship: <https://www.belship.com/nl/4/610101/mini-staaldrblokje-met-sluiting.aspx>
- Roest, R. (2018, april 4). Bezoek aan Stekon - groothandel in sensoren en meetapparatuur. (M. Bremmers, & D. Kersing, Interviewers)
- Slooff, J. W. (2013). Chapter 3: Forces, Moments and Motions. In J. Slooff, *The Aero- and Hydrodynamics of Keel Yachts* (pp. 19-22). Uithoorn, The Netherlands: Springer International Publishing.
- Takezawa, A., Nishiwaki, S., Kitamura, M., & Silva, E. C. (2010, Maart 13). Topology optimization for designing strain-gauge load cells. *Struct Multidisc Optim*, pp. 387-402.
- Trekkracht staalkabel tabel. (2018). Retrieved from Staalkabel Stunter: <https://www.staalkabelstunter.com/service/trekkracht-staalkabel/>
- Wedstrijdzeilen - Topsport. (n.d.). Retrieved from Watersportverbond: <http://zeilen.watersporters.nl/wedstrijdzeilen/topsport/>
- Zeilsport in Nederland in de lift. (2014, oktober 22). Retrieved from Pean.nl: <https://www.pean.nl/nl/nieuws/berichten-2014-eerste-hafljaar/toename-zeilsport>

Bijlage

Bijlage I - Signaalverwerking van de hangbank

Naast het oriënteren welke sensoren er in de boot zitten, is het ook van belang om te kijken hoe de signaalovergang binnen de huidige hangbank in elkaar zit (*figuur 1*).



Figuur 1: Wanneer iemand op de forceplate gaat zitten zal dit geregistreerd worden door de vier druksensoren waarvan de forceplate is voorzien. De vier druksensoren geven een uitput in mV. De output wordt doorgeleid naar signaalversterkers zodat er een signaal uitkomt tussen de 0 en 5 Volt. Het signaal kan vervolgens doorgevoerd worden naar Arduino. Arduino zet het analoge signaal om naar digitale bits (0-1024). Met deze input is er gecodeerd en wordt het signaal via een Arduino Ethernet verzonden naar een Raspberry Pi en Sailmon. De Sail Mon weergeeft het op de monitor.

De informatie die uit de forceplate en de hangband komen worden met een signaalversterker versterkt en via een Arduino weergegeven.

De vier sensoren in de forceplate geven een signaal af in millivolt. Afhankelijk van de kracht die erop komt zullen de hoeveel millivolts verschillen. De maximale kracht die de forceplate aankan is 250 kg. Om het maximum te bereiken zal er een maximaal signaal uitkomen van 30 mVolt. Dus dat betekent dat het aantal millivolts gelijkgesteld kan worden aan het gewicht:

$$250 \text{ kg} = 30 \text{ mVolt}$$

$$125 \text{ kg} = 15 \text{ mVolt}$$

Omdat millivolts niet met een Arduino uitgelezen kunnen worden is het signaal versterkt.

1.1 Signaalversterkers

Elke sensor zit apart aan een signaalversterker verbonden (zie *bijlage II* voor extra informatie over de versterker). De signaalversterker versterkt het signaal van millivolt naar 0-10 Volt. Hierbij staat 10 Volt gelijk aan een belasting van 250kg.

Arduino werkt echter met een signaal van 0-5 volt. Om het signaal te halveren zit er een code in de signaalversterker verwerkt. Hierin is geprogrammeerd dat de signaalversterker 'denkt' dat er een sensor van 500 kilo aan verbonden zit. Dus bij 10 volt zou er dan een gewicht van 500 kilo aanhangen. Zodra er dus 5 volt gegenereerd wordt staat dit gelijk aan 250 kilo.

1.2 Arduino

Het analoge signaal zal door de Arduino omgezet worden naar digitaal. Het maximale aantal bits waarmee de analoge input werkt is 10 bits. Dit staat gelijk aan een getal tussen de 0 en 1023. Hierna wordt er een integer van gemaakt. Met deze waardes kan gerekend worden. Waarde 1023 staat daarmee gelijk aan een input van 250 kilo.

De data uit Arduino wordt via een ethernet switch doorgeleid naar een Sailmon processor, Raspberry Pi en een monitor. Voor het afbakenen van deze opdracht is er gesteld dat er alleen rekeningen gehouden hoeft te worden met wat er uiteindelijk op de monitor verschijnt.

Bijlage II - Rinstrum 1101 versterker

Handleiding en programmatuur

Rinstrum 1101 – InnoSail

Let op:

- Maak eerst alle aansluitingen op de print.
- Zet als laatste de spanning (12-24V) erop, daarna niet of voorzichtig aanraken.
- Voorkom beschadiging door statische elektriciteit.

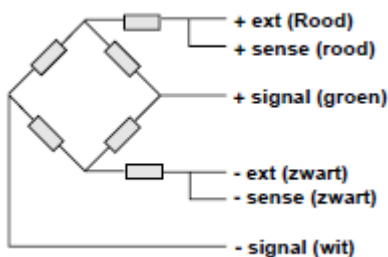
Load cell kabel aansluiten:

Rood = Exc+ met een lus naar sense+

Zwart = Exc- met een lus naar sens-

Groen = signal +

Wit = signal -

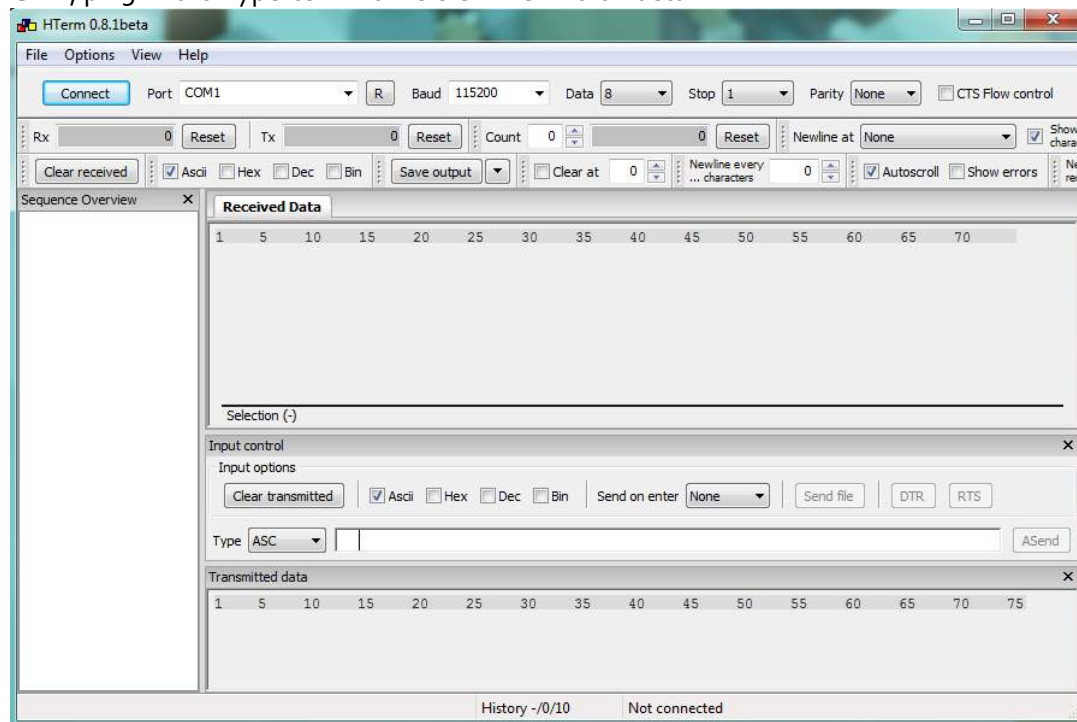


RS232:

RX, pin3 groen.

Tx, pin2 rood.

GND, pin5 zwart. Hyperterminal versie: HTerm 0.8.1beta



Communicatie via Hyperterminal

Com1

9600

8

1

None

Vinkje bij ASCII en HEX

Programmeer voorbeeld:

- 2 load cells met capaciteit van 250kg, gevoeligheid van 2,9985 en 3,0013mV/V
- Totaal 500kg, analoge uitgang 0-10V.

1. IAD2,1,50000; Decimaalpunt op 2.
2. LDW; Nul afstellen.
3. LWT50000,29999; Span bij 500,00kg gemiddelde gevoeligheid van de 2 lc's 1,9995mV/V.
4. ANL1,14,0,50000; Analoge uitgang: Spanning, Netto, 0Volt is 0kg, 10V is 200kg
5. TDD1; Instellingen opslaan.

Analoog uitgangssignaal controleren met een bekend gewicht.

Uitleg commando's

Gewicht opvragen met het commando: MSV?; <asend>

7.2 ANL: analoge uitgang programmeren (Bladzijde 16)

Opvragen instellingen met het commando: ANL?;

- Parameter 1: 0 is stroomuitgang
 1 is spanninguitgang.
- Parameter 2: 13 is bruto
 14 is netto
- Parameter 3: waarde bij 4mA of 0V uitgang.
- Parameter 4: waarde bij 20mA of 10V uitgang.

4 parameters ingeven gescheiden door komma's en afsluiten met puntkomma.

Dus bijv. anl0,13,0,1500; <asend>LWT?;

Save settings: Tdd1;<asend>

7.2.2 ASF: filter instellen (Bladzijde 17)

Opvragen instellingen met het commando: ASF?;

- Parameter 1: Filter
 Filter instelbaar van 0 tot 8 0=onrustig 8 is rustig
- Parameter 2: Motion

2 parameters ingeven gescheiden door komma's en afsluiten met puntkomma.

Dus bijv. asf4,2; <asend>

Save settings: Tdd1;<asend>

7.2.4. COF: Set Output Format (Bladzijde 18)

Opvragen: cof?;<asend>

Instellen: cof4,20,10;<asend>

Save settings: Tdd1;<asend>

7.2.6. IAD: Parameters instellingen (Bladzijde 21)

Parameter 1: Decimale punt 0 tot 5

Parameter 2: Resolutie 1 tot 100

Parameter 3: Capaciteit zonder decimale punten

3 parameters ingeven gescheiden door komma's en afsluiten met puntkomma.

Dus bijv. IAD 0,1,1500; <asend>

Save settings: Tdd1;<asend>

5.3. Digitale kalibratie (direct met mV/V)

5.3.1. Digitaal nulpunt instellen:

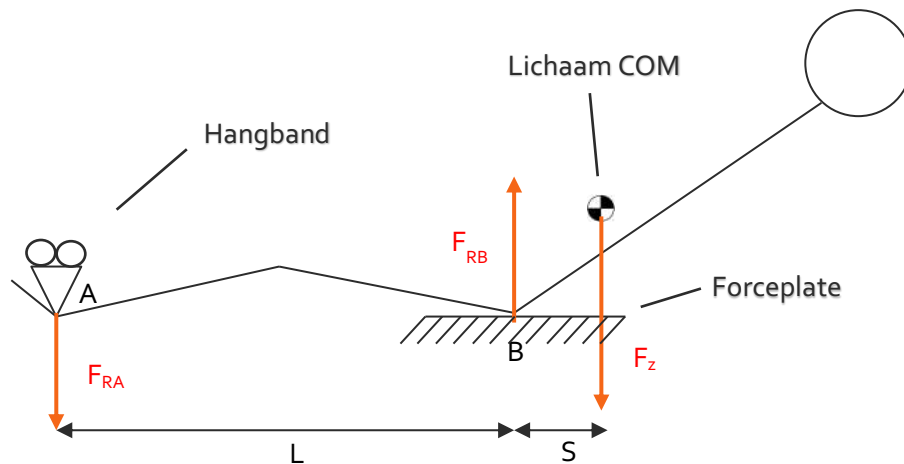
- verwijder het gewicht van de schaal of load cell.
- LDW; <asend> 1101 neemt het signaal van de onbelaste LC

5.3.2. Digitale span Kalibratie

- Stel de parameters in met IAD (zie boven).
- Gebruik het LWT commando gevolgd door de capaciteit van de load cell en gevoeligheid in mV/V zonder decimaal punt. Bijvoorbeeld:
 Capaciteit load cell 1.500 kg.
 Gevoeligheid 29975
 LWT1500,29975; <asend>
- Save settings: Tdd1;<asend>

Met het commando LWT? wordt de mV/V waarde getoond

Bijlage III - Uitwerkingen vergelijkingen hoofdstuk 2.2.2



$$(1) F_{RA} = F_Z \frac{S}{L}$$

$$(2) F_{RB} = F_Z \frac{S+L}{L}$$

Omschrijven geeft:

$$F_Z = L * \frac{F_{RA}}{S}$$

Invullen in (2):

$$F_{RB} = L * \frac{F_{RA}}{S} * \frac{S+L}{L}$$

Breuken bij elkaar voegen en L wegstrepen:

$$F_{RB} = \frac{\cancel{L} * F_{RA} * (S+L)}{S * \cancel{L}}$$

Omschrijven:

$$F_{RB} = (S+L) \frac{F_{RA}}{S}$$

F_{RA} naar de andere kant halen:

$$\frac{F_{RB}}{F_{RA}} = (S+L) \frac{1}{S}$$

Rechterkant uitwerken:

$$\frac{F_{RB}}{F_{RA}} = 1 + \frac{L}{S}$$

Omschrijven:

$$\frac{L}{S} = \frac{F_{RB}}{F_{RA}} - 1$$

L naar de andere kant brengen:

$$S = \frac{L}{\left(\frac{F_{RB}}{F_{RA}} - 1\right)}$$

Invullen in F_Z :

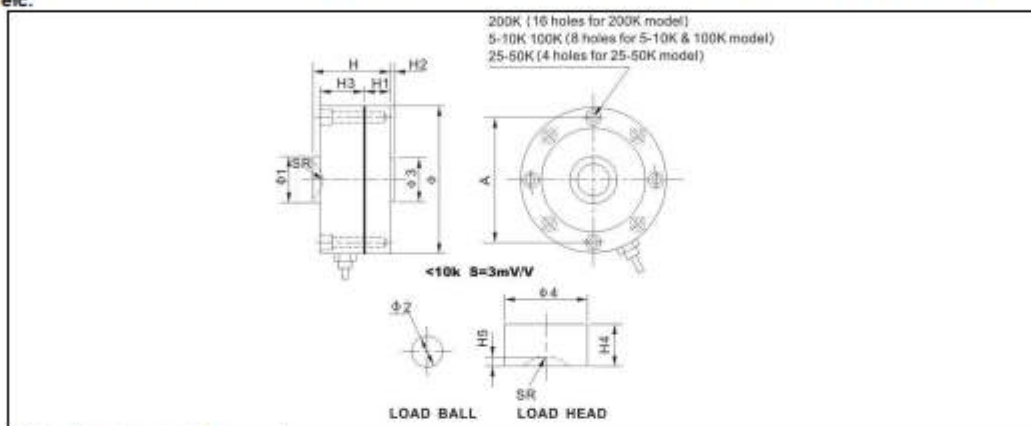
$$F_Z = L * \frac{F_{RA}}{\left(\frac{L}{\left(\frac{F_{RB}}{F_{RA}} - 1\right)}\right)}$$

Bijlage IV – Datasheets sensoren marktonderzoek

1. Tension/compression load cell



Wheel shaped loadcell, shear beam. Good rigidity, strong side force resistance, high output to 4mV/V, overload self-locking. Potted sealed or hermetically sealed, IP67 or IP68. Widely used in truck scale, railroad scale, tester, crane scale, etc.



Main dimensions and accessories :

Capacity		Size mm						
Klb	†	A	Φ	Φ1	Φ2	Φ3	Φ4	H
0.2-15	0.1-7.5	88.9	104.7	32.0	22.2	31.8	41.0	53.8
25-50	10-25	101.6	120.7	38.9	38.1	31.8	43.0	77.8
100	50	116.8	140.0	50.4	41.3	31.8	59.0	86.2
150-200	60-100	162.0	200.0	76.0	76.2	50.8	98.0	125.0
Klb	T	H1	H2	H3	H4	H5	SR	
0.2-15	0.1-7.5	19.0	1.0	31.8	14.0	5.0	15.9	
25.50	10-25	24.0	1.0	41.1	19.0	8.0	22.2	
100	50	29.0	1.0	50.8	32.0	7.8	25.0	
150-200	60-100	42.0	1.1	70.0	55.0	13.0	45.0	

Specifications :

Rated output (mV/V)	2.00 ± 0.010 4.00 ± 0.010
Nonlinearity	± 0.03% FS
Hysteresis	± 0.03% FS
Repeatability	± 0.02% FS
Creep (30 minutes)	± 0.02% FS
Zero balance	± 1.00% FS
Temperature Effect on Zero	± 0.02% FS/10°C
Temperature Effect on Output	± 0.02% FS/10°C
Input Resistance (Ω)	385 ± 15 765 ± 15
Output Resistance (Ω)	350 ± 3 700 ± 5
Insulation Resistance	> 5000M Ω
Excitation Voltage	10V (DC/AC)
Compensated Temperature Range	-10°C to +50°C
Operating Temperature Range	-20°C to +60°C
Safe Overload	120% FS
Cable	Φ 6 x 9m

Cable color code: Input: Red(+) Black (-); Output: Green(+) White (-)



STENSOR B.V.

Meer en Duin 64b - 2163 HC Lisse

Phone : +31 (0)88 4224420 – Fax : +31 (0)88 4224421

www.stensor.com – info@stensor.com

2. S-beam load cell

VPG Transducers

Celtron • Revere • Sensortronics • Tedea-Huntleigh



S-Type Load Cell

Model STC

Celtron

SPECIFICATIONS			
PARAMETER	VALUE		UNIT
NTEP/OIML accuracy class	NTEP III & IIIL	Non-Approved	
Maximum no. of intervals (n)	III 5000 single* IIIL10000 single*	2000	
$Y = E_{max}/V_{min}$	10000	5000	Maximum available
Standard capacities (E_{max}) (Aluminum)	5, 10, 20		kg
Standard capacities (E_{max}) (Steel)	25, 50, 75, 100, 250, 500, 750, 1000, 1500, 2000, 2500, 5000		kg
	250, 300, 500, 750, 1k, 1.5k, 2k, 2.5k, 3k, 5k, 7.5k, 10k, 15k, 20k, 40k		lbs
Rated output—R.O. (Aluminum)	2.0		mV/V
Rated output—R.O. (Steel)	3.0		mV/V
Rated output tolerance	0.25		±% of rated output
Zero balance	1		±% of rated output
Non-linearity	0.020	0.020 (SS: 0.05)	±% of rated output
Hysteresis	0.020	0.020 (SS: 0.05)	±% of rated output
Non-repeatability	0.020		±% of rated output
Creep error (20 minutes)	0.030		±% of rated output
Zero return (20 minutes)	0.030		±% of rated output
Temperature effect on min. dead load output	0.0015	0.0026	±% of rated output/°C
Temperature effect on sensitivity	0.0010	0.0015	±% of applied load/°C
Compensated temperature range	-10 to +40		°C
Operating temperature range	-20 to +60		°C
Safe overload	150		% of R.C.
Ultimate overload	200 (Aluminum) / 300 (Steel)		% of R.C.
Excitation, recommended	10		VDC or VAC RMS
Excitation, maximum	15		VDC or VAC RMS
Input impedance	410±5 (Aluminum) / 385±5 (Steel)		Ω
Output impedance	350±3		Ω
Insulation resistance	>5000		MΩ
Construction	Aluminum or Nickel-plated alloy steel **		
Environmental protection	IP67		

* Capacities 250–20k lbs

** Stainless steel available

All specifications subject to change without notice.

FM Approval

Intrinsically Safe: Class I, II, III; Div. 1 Groups A-G

Non-Incendive: Class I; Div. 2 Groups A-D

3. Stensit Load Sensing Pin

Load Cells

CERTIFICATE OF CALIBRATION

Model	LP
Capacity	1.8t
Serial No.	o6
Output	1.4974 mV/V
Zero Balance	< +/- 1,00% of Full Scale
Creep (30 mins)	< +/- 0,05% of Full scale
NonLinearity	< +/- 3,22% of Full scale
Hysteresis	< +/- 0,32% of Full scale
Repeatability	< +/- 0,05% of Full scale
Temperature Effect on Output	< 50 PPM/°C of Applied Load
Temperature Effect on Zero	< 50 PPM/°C of Applied Load
Temperature Range: Operating	-20 °C to +60 °C
Temperature Range: Compensated	-10 °C to +50 °C
Safe Overload	120 % of Capacity
Input Impedance	765 +/- 15 Ohms
Output Impedance	700 +/- 5 Ohms
Insulation Impedance	> 5000 MOhms
Excitation: Recommended	10 V DC/ AC
Excitation: Maximum	20 V DC/ AC

Color Code:

Red	+ Excitation
Black	- Excitation
Green	+ Signal
White	- Signal

Bijlage V – Valideren sensor

Resultaten

De twee linker tabellen geven de opgelegde kracht en de bijbehorende verwachte millivolts. Rechts het aantal gemeten millivolts en wanneer deze omgerekend zijn naar kilogram.

Stensit load pin waardes:

Kracht hydraulische pomp (in kg)	Verwachte millivolts	Aantal millivolts gemeten	De millivolts omgerekend naar gewicht (in kg)
0 kg	0 mV	-0,50 mV	-56,18 kg
100 kg	0,89 mV	0,21 mV	23,60 kg
200 kg	1,87 mV	0,94 mV	105,62 kg
300 kg	2,67 mV	1,86 mV	208,99 kg
400 kg	3,56 mV	2,84 mV	319,10 kg
500 kg	4,45 mV	3,81 mV	428,09 kg
600 kg	5,34 mV	4,81 mV	540,45 kg
700 kg	6,23 mV	5,77 mV	658,31 kg
800 kg	7,12 mV	6,78 mV	761,80 kg
900 kg	8,01 mV	7,73 mV	868,54 kg

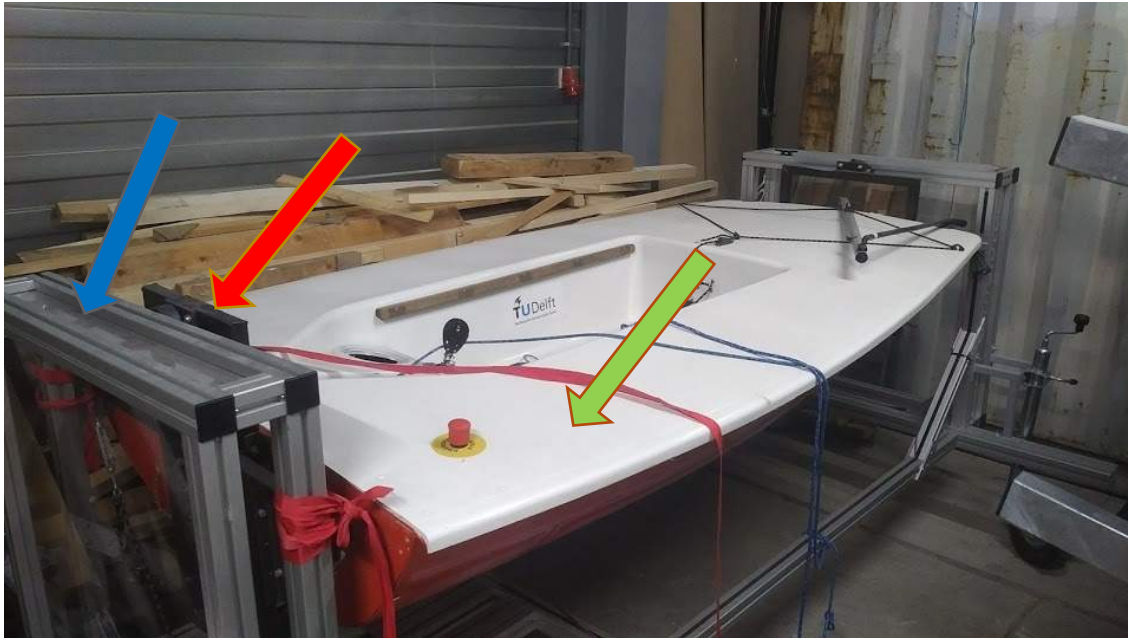
S-Beam load cell:

Kracht hydraulische pomp (in kg)	Verwachte Volts	Aantal Volts gemeten	De Volts omgerekend naar gewicht (in kg)
0 kg	0 V	0 V	0 kg
100 kg	1,0 V	1,0080V	100,80 kg
200 kg	2,0 V	2,0080V	200,80 kg
300 kg	3,0 V	3,0079V	300,79 kg
400 kg	4,0 V	4,0078V	400,78 kg
500 kg	5,0 V	5,0079V	500,79 kg

Bijlage VI- Aanpassingen hangbank

In de figuur hieronder is te zien hoe de zeilsimulator van de TU- Delft eruitziet. De simulator bestaat uit drie delen:

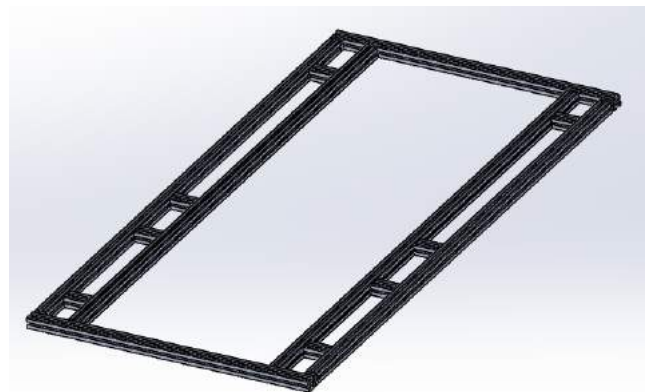
1. Het dek (groene pijl)
2. Een ijzeren frame waar de boot in opgehangen is (rode pijl)
3. Een aluminium frame, bestaande uit BSB-profielen (blauwe pijl).



1. Het dek

De bodem is verwijderd om plaats te maken voor de sensoren. Vanwege het weghalen van de bodem, is het dek verstevigd.

Dit wordt gedaan met een aluminium frame. Tevens zullen ook de forceplates op het aluminium rusten. Omdat er bij het nieuwe dek een forceplate aan beide kanten is gekomen zijn er extra aluminium stukken toegevoegd aan het vierkant waar de load cells op kunnen rusten. Ook is het verstevigd met hout. Het hout zorgt voor een drukverdeling en het aluminium profiel zorgt voor de sterkte en draagt het geheel.



1.1 Vervaardigen

De stukken hout en aluminium voor het verstevigen zijn uit de oude hangbank hergebruikt. Vervolgens is de Laser-zeilboot verwijderd uit de zeilsimulator om te kunnen bewerken. De bodem is eruit gezaagd en de stukken multiplex zijn op maat gemaakt. Vervolgens zijn de onderkant en zijkanten van de kuip verstevigd met hout. Het hout is op de onderkant van het dek bevestigd met porschuim, om zo alle ruimte ertussen op te vullen en een vaste verbinding te vormen tussen de twee onderdelen.



1.2 Eindproduct

Op onderstaande afbeelding is het eindproduct voor het dek te zien. De stukken aluminium zijn verbonden met elkaar. Er is ruimte gemaakt in het dek voor twee forceplates.

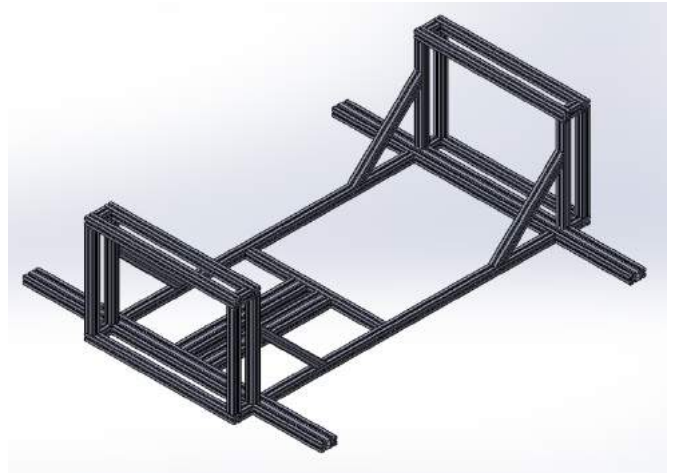


2. Het aluminium frame

Naast het dek worden beide frames ook hergebruikt. Het aluminium frame bevat al twee rollagers en is sterk genoeg om een boot plus persoon te dragen. Er zijn echter aanpassingen nodig:

1. Het aluminium frame moet lager gemaakt worden
2. Het frame moet korter in lengte omdat het aangepast moet worden aan het vervaardigde dek, zie deel 1. Het dek.

Het aluminium frame wordt uiteindelijk 700mm hoog en 2270mm lang. Zodat het vervaardigde dek er precies in past.



3. Het ijzeren frame

Het ijzeren frame, het frame wat het dek en het aluminium frame zal verbinden, is in een vierkant gelast zodat het vervaardigde dek hierop kan rusten.



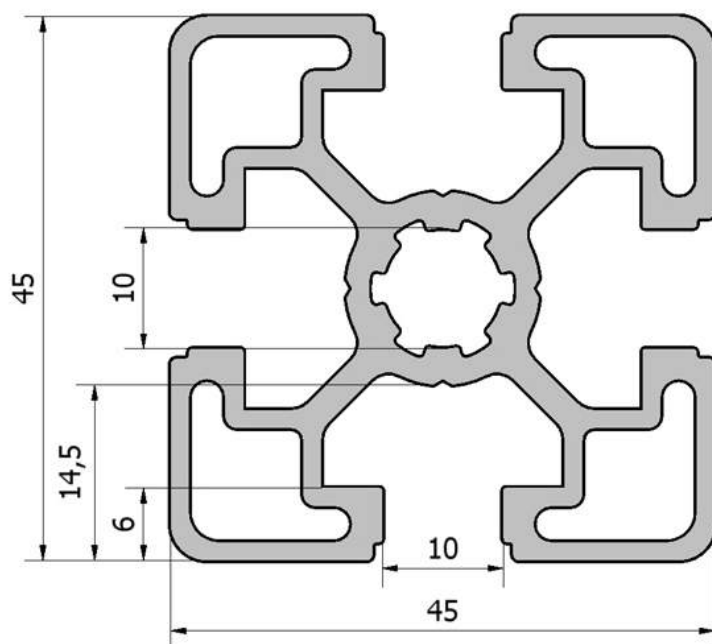
4. De totale aanpassing

Op de figuur hieronder is het eindproduct te zien als alle stappen zijn doorlopen en aangepast.

Aan de linker- en rechterzijde is te zien hoe de hangbank eruitziet na de aanpassingen. Aan linkerzijde is zowel het aluminium en stalen het frame te zien. Aan de rechterzijde is het dek te zien welke eroverheen geplaatst wordt.



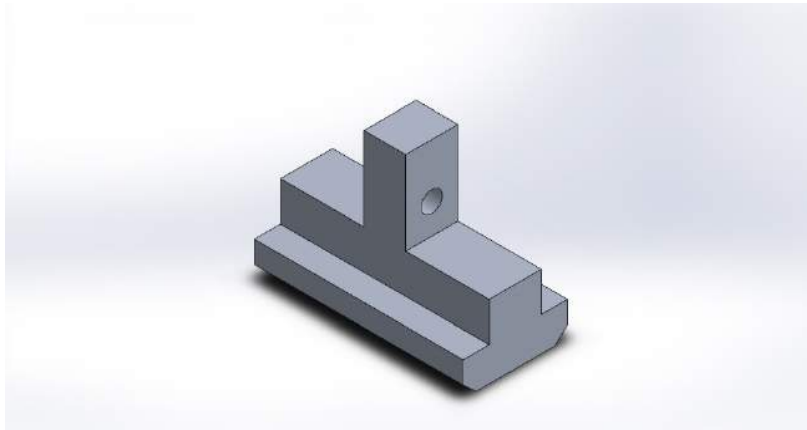
Bijlage VII- Technische gegevens aluminium BSB-profiel



Afbeelding 36: Dorsnede plus maten 45x45 BSB-profiel

Technische gegevens	
Materiaal	AlMg Si 0,5 F25 geanodiseerd (3.3206.72)
Maattolerantie	DIN EN 17615
Afmetingen	45 mm x 45 mm
T-sleuf type	10b
Standaardlengte	6 meter
Gewicht per meter	1,6 kilogram
Traagheidsmoment Ix	11,5 cm ⁴
Traagheidsmoment Iy	11,5 cm ⁴
Weerstandsmoment Wx	5,1 cm ³
Weerstandsmoment Wy	5,1 cm ³
Doorsnee oppervlakte	6,1 cm ²

Bijlage VIII - Simulatie van het blokje



Description

Analyse overgangsblokje

Simulation of blokje

Designer: Marco Bremmers

Study name: SimulationXpress Study

Analysis type: Static

Table of Contents

Description 49

Assumptions Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.

Model Information 50

Material Properties 51

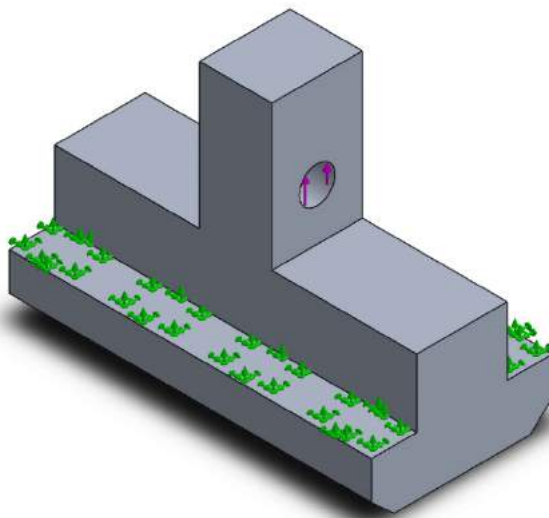
Loads and Fixtures 51

Mesh information 52

Study Results 53

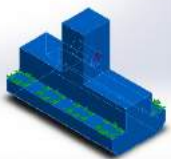
Conclusion Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.

Model Information

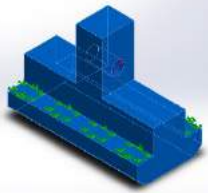


Model name: blokje
Current Configuration: Default

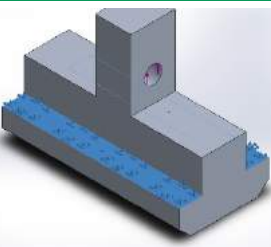
Solid Bodies

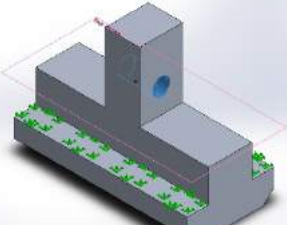
Document Name and Reference	Treated As	Volumetric Properties	Date Modified
Cut-Extrude7 	Solid Body	Mass:0.0247036 kg Volume:9.14947e-006 m ³ Density:2700 kg/m ³ Weight:0.242095 N	Jun 10 00:08:40 2018

Material Properties

Model Reference	Properties	Components
	Name: 6061-T6 (SS) Model type: Linear Elastic Isotropic Default failure criterion: Max von Mises Stress Yield strength: 2.75e+008 N/m² Tensile strength: 3.1e+008 N/m²	SolidBody 1(Cut-Extrude7)(Part2)

Loads and Fixtures

Fixture name	Fixture Image	Fixture Details
Fixed-3		Entities: 2 face(s) Type: Fixed Geometry

Load name	Load Image	Load Details
Force-2		Entities: 1 face(s), 1 plane(s) Reference: Top Plane Type: Apply force Values: ---, ---, 3000 N

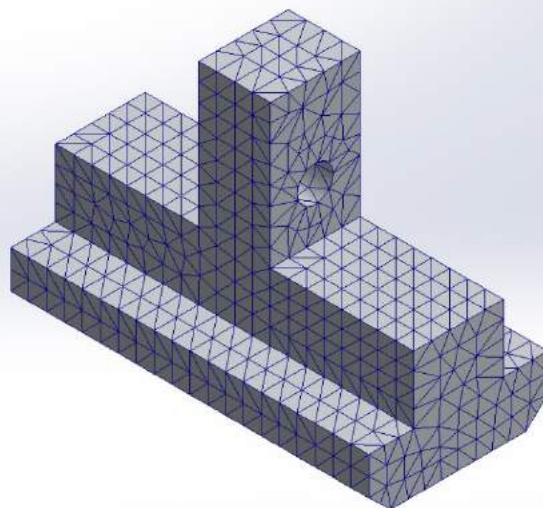
Mesh information

Mesh type	Solid Mesh
Mesher Used:	Standard mesh
Automatic Transition:	Off
Include Mesh Auto Loops:	Off
Jacobian points	4 Points
Element Size	2.09234 mm
Tolerance	0.104617 mm
Mesh Quality Plot	High

Mesh information - Details

Total Nodes	11917
Total Elements	7552
Maximum Aspect Ratio	4.3742
% of elements with Aspect Ratio < 3	99.8
% of elements with Aspect Ratio > 10	0
% of distorted elements(Jacobian)	0
Time to complete mesh(hh:mm:ss):	00:00:01
Computer name:	

Model name: blokje
Study name: Simulation1 (press Study-Default)
Mesh type: Solid Mesh

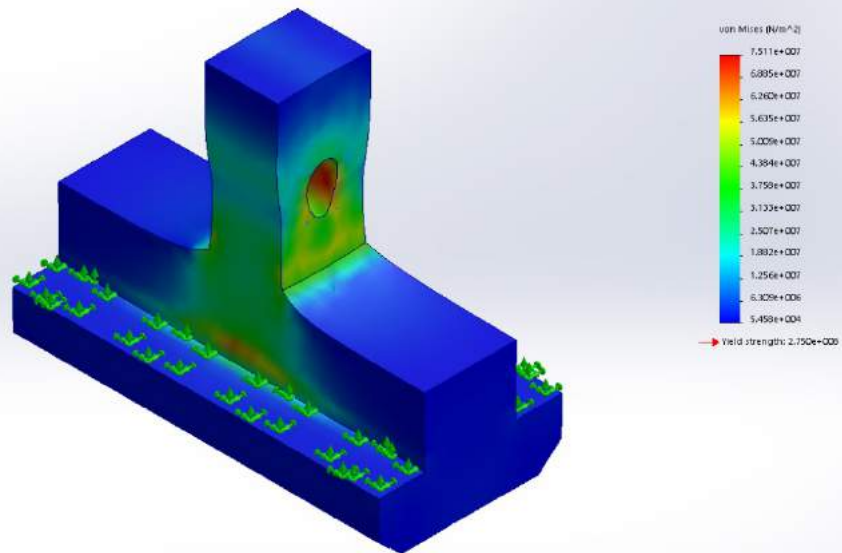


SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

Study Results

Name	Type	Min	Max
Stress	VON: von Mises Stress	5.458e+004N/m ² Node: 126	7.511e+007N/m ² Node: 11835

Model name: blokje
Study name: SimulationXpress Study (Default)
Plot type: Static node stress stress
Deformation scale: 427.899

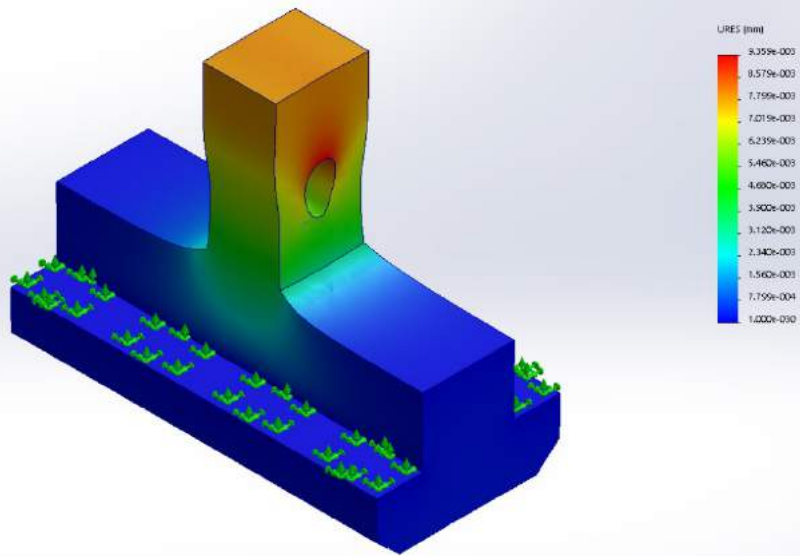


SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

blokje-SimulationXpress Study-Stress-Stress

Name	Type	Min	Max
Displacement	URES: Resultant Displacement	0.000e+000mm Node: 34	9.359e-003mm Node: 781

Model name: blokje
 Study name: SimulationXpress Study (Default)
 Plot type: Static displacement Displacement
 Deformation scale: 427.999

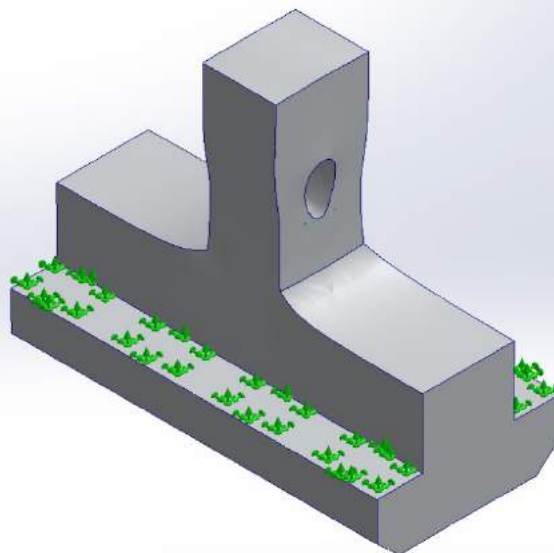


SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

blokje-SimulationXpress Study-Displacement-Displacement

Name	Type
Deformation	Deformed shape

Model name: blokje
 Study name: SimulationXpress Study (Default)
 Plot type: Deformed shape Deformation
 Deformation scale: 427.999



SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

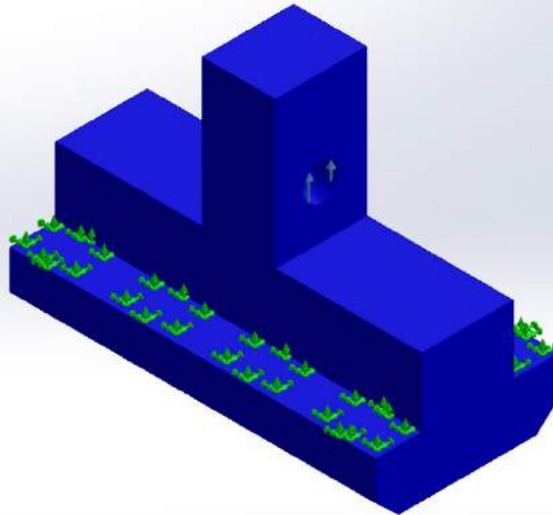
blokje-SimulationXpress Study-Displacement-Deformation

Name	Type	Min	Max
Factor of Safety	Max von Mises Stress	3.661e+000	5.039e+003

Node: 11835

Node: 126

Model name: blokje
Study name: SimulationXpress Study (Default)
Plot type: Factor of Safety / Factor of Safety
Criterion: Max von Mises Stress
Red < FOS = 1 < Blue



SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

blokje-SimulationXpress Study-Factor of Safety-Factor of Safety

Bijlage IX – Arduino Code

const int analogInPin = A5; // Analog input pin that the potentiometer is attached to

```
int sensorValue = 0;    // value read from the pot
int outputValue = 0;    // value output to the PWM (analog out)
```

```
double value = 0;
double rer = 0;
double rm = 0;
double cal = 0;
double moment = 0;
void setup() {
  // initialize serial communications at 9600 bps:
  Serial.begin(9600);
  sensorValue = analogRead(analogInPin);
  value = sensorValue;
  rer = (value / 1024) * 500;
}
```

```
void loop() {
  // read the analog in value:
  sensorValue = analogRead(analogInPin);
  // map it to the range of the analog out:
  Serial.print("sensor = ");
  Serial.println(sensorValue);
  value = sensorValue;
  double gewicht = value * 0.3 ; (500 / 1024);
  Serial.print("Gewicht = ");
  Serial.println(gewicht);
  Serial.print("Moment = ");
  rm = gewicht * 0.45;
  moment = (gewicht * 0.45);
  Serial.println(moment);

  // Serial.println(rer);
  // wait 2 milliseconds before the next loop
  // for the analog-to-digital converter to settle
  // after the last reading:
  delay(400);
}
```

Bijlage X - Definitief programma van eisen en wensen

Randvoorwaarden

R1	De hangbank moet inzicht geven in het <i>richtend moment</i> en dit op een scherm weergeven.
R2	De functie van de forceplate van de hangbank moet gewaarborgd blijven.
R3	Ruimte is beperkt, de hangbank moet op dezelfde plaats kunnen blijven staan en aanpassingen moeten dit toelaten.
R4	Er is geen beschikbaar budget voor de hangbank

Eisen:

E1	De meetopstelling moet valide krachten geven, de afwijking mag maximaal 5% zijn.
E2	Een persoon moet aan beide zijden van de hangbank het moment kunnen meten.
E2.1	Het richtend moment van beide zijde moet uitgedrukt worden in één output signaal
E3	De hangbank moet uitgerust worden met een draaipunt in de ξ -as.
E4	Er moet een krachtmeter tussen de boot en de buitenwereld bevestigd worden.
E5	De krachtmeter moet piekkrachten van 3000N kunnen weerstaan.
E6	Voor de meetopstelling moet er gebruik gemaakt worden van de S-Beam Load Cell

Wensen

W1	Het systeem moet een ' <i>Plug and Play</i> ' systeem worden. Een zeiler moet zelf metingen kunnen uitvoeren.
----	---