

Een vergelijking van de rekenmethode van de rolringdemper

Jon-Danilo Kortram
11110333

Een vergelijking van de berekening van de rolringdemper

Een afstudeerverslag in opdracht van Bos Nieuwerkerk en de Haagse Hogeschool

Jon-Danilo Kortram
11110333



Voorwoord

Dit rapport is tot stand gekomen in het kader van mijn afstuderen van de opleiding werktuigbouwkunde aan de Haagse Hogeschool te Delft.

Het rapport beschrijft de resultaten van mijn afstudeeronderzoek dat is uitgevoerd in opdracht van Bos Nieuwerkerk B.V.

Ik zou bij dezen graag al mijn collega's van Bos Nieuwerkerk willen bedanken voor hun collegialiteit en gezelligheid. In het bijzonder zou ik dhr.M. Verklij willen bedanken, voor zijn hulp bij het bouwen van mijn proefopstelling.

Daarnaast zou ik dhr C. Bezemer willen bedanken voor zijn bereidheid om mijn vragen te beantwoorden, en voor zijn geduld en begrip voor alle keren dat ik de koffie ben vergeten te halen.

Tot slot zou ik mijn begeleider van de Haagse Hogeschool, dhr. Van Gils hartelijk willen bedanken voor zijn feedback en hulp.

Dit rapport beschrijft het afstudeeronderzoek dat is uitgevoerd bij het bedrijf Bos Nieuwerkerk B.V. Bos Nieuwerkerk is een producent van industriële schoorstenen. Bij de bouw van schoorstenen is het soms noodzakelijk dat deze worden uitgerust met een trillingsdemper. Schoorstenen zijn namelijk gevoelig voor dwarstrillingen, deze trillingen veroorzaken wisselspanningen die de levensduur in negatieve zin beïnvloeden. Een trillingsdemper heeft als doel de levensduur van de schoorsteen te verbeteren door de vibraties uit te dempen. De trillingsdemper die moet worden gebruikt is afhankelijk van het ontwerp van de schoorsteen. Tijdens het ontwerpproces worden de specificaties van de trillingsdemper bepaald met behulp van een rekenprogramma. Het doel van het afstudeeronderzoek is om de berekeningen te verifiëren. Dit onderzoek is alleen van toepassing op een bepaald type demper; dit type trillingsdemper wordt een rolringdemper genoemd.

Tijdens het onderzoek is de rekenmethode van het rekenprogramma getoetst. Hiertoe is allereerst de rekenmethode geanalyseerd, vervolgens zijn de gevonden gegevens vergeleken met de resultaten van een zelfgebouwde proefopstelling.

Uit de opbouw van de hoofdstukken wordt de onderzoeksmethode duidelijk:

Een trillingsdemper kan bijdragen aan een betere levensduur van de schoorsteen. Een schoorsteen wordt namelijk op wind belast, daarbij raakt de schoorsteen in beweging, wat kan leiden tot wisselspanningen. Dergelijke wisselspanningen hebben een negatief effect op de levensduur. Het toepassen van een goede trillingsdemper gaat dit effect tegen. Het systeem van een schoorsteen en een trillingsdemper kan worden benaderd door een aantal wiskundige modellen. Het is daardoor mogelijk om het gedrag van dit systeem te voorspellen. Aan de hand van deze wiskundige benadering kan de trillingsdemper worden gekozen zodat de uitslag van de schoorsteen het beste wordt uitgedempt.

Tijdens de analyse van deze wiskundige benadering kwam naar voren dat de mathematische vergelijkingen die voor een bepaald type trillingsdemper gelden, niet helemaal van toepassing zijn op de rolringdemper. Daarom zijn de vergelijkingen aangepast zodat deze wel op de rolringdemper kunnen worden gebruikt. Hierdoor wordt het mogelijk om aan de hand van meetresultaten die zijn verkregen uit de proefopstelling terug te rekenen wat de demping was. (De proefopstelling moest worden ontworpen, dat is gebeurd aan de hand van de methodische ontwerp methode). Na een reeks aan metingen kon bij verschillende parameters de gemiddelde demping worden bepaald. Deze waarde kon worden vergeleken met de dempwaarde die het rekenprogramma bepaald.

De dempwaardes bleken niet geheel overeen te komen. Om die reden wordt een aanbeveling gedaan voor een alternatieve vergelijking die kan worden gebruikt om de demping van de rolringdemper te berekenen.

Inhoudsopgave

Samenvatting.....	4
Verklarende woordenlijst.....	7
Symbolenlijst	8
1 Inleiding.....	10
1.1 Bedrijfsprofiel.....	10
1.2 Aanleiding om een demper toe te passen	10
1.3 Opdrachtomschrijving	11
1.4 Opbouw rapport.....	12
2 Oriëntatie	14
2.1 Literatuurstudie van de rolringdemper	15
2.1.1 Doel van een trillingsdemper	15
2.1.2 Reden om een demper toe te passen	15
2.1.3 Functioneren van een trillingsdemper.....	16
2.1.4 Het logaritmisch decrement.....	19
2.1.5 Functioneren van een demper in een schoorsteen	21
2.1.6 De hydraulische trillingsdemper	24
2.1.7 De rolringdemper.....	26
2.2 Het rekenprogramma Chimney™	28
2.3 Methode	30
3 Analyse	31
3.1 Een massa-zwaartekracht-wrijving-systeem.....	31
4 De proefopstelling.....	35
4.1 Methodisch ontwerpen voor proefopstelling.....	36
4.2 Uiteindelijk ontwerp	44
5 Meetresultaten	45
5.1.1 Verwerking van meetgegevens van één meting	46
5.1.2 Gemiddelde demping van meerdere metingen	51
5.2 De onderzoeksresultaten vergeleken met Chimney™	54
6 Conclusie	57
7 Bronvermelding	58
8 Bijlagen	59

Eigenfrequentie:	Frequentie waarmee een systeem zal gaan trillen als het vanuit een evenwichtspositie wordt bewogen vervolgens wordt losgelaten
Hydraulische demper:	Type trillingsdemper dat in schoorstenen wordt toegepast
Hysterese:	Energieverlies ten gevolge van materiaalwrijving
Kritische demping:	Bij deze demping zal een trilling precies na één periode uitdempen.
Kritische windsnelheid:	Bij deze windsnelheid zullen de loslatende wervelingen ertoe leiden dat de schoorsteen precies in de eigen frequentie gaat trillen
Logaritmisch decrement:	Natuurlijke logaritmische ratio tussen de amplitudes van opeenvolgende trillingen
Rolringdemper:	Type trillingsdemper dat in schoorstenen wordt toegepast
Tribologie:	Wrijvingskunde; verzamelnaam voor het onderzoek naar wrijvings- en slijtageverschijnselen
Vermoeiingsverschijnselen:	Materiaalmoetheid; fenomeen dat materiaal bij aanhoudende wisselende belasting bezwijkt
Voorspelde trendlijn:	Weergave van de afname van de amplitudegrootte in de tijd (zoals deze is uitgerekend op basis van vergelijking [2.23])
Waargenomen trendlijn:	Weergave van de afname van de amplitudegrootte in de tijd (zoals deze is waargenomen tijdens de metingen)

a	= amplitude [m]	<i>Afwijkende eenheden worden per vergelijking opgegeven</i>
A	= amplitude [mm]	
A_n	= amplitude na 'n' slingeren [mm]	
$A_{n\text{ gem}}$	= gemiddelde amplitude na 'n' slingeren (over meerdere metingen) [mm]	
A	= constante factor [verg. 2.9 t/m 2.12]	
A_f	= frontaal oppervlak [m ²]	
a_n	= amplitude op de n'de uitslag	
b	= buitendiameter [m]	
B	= constante factor [verg. 2.9 t/m 2.12]	
c	= dempingsconstante [Ns/m]	
c_{1i}	= ideale dempingsconstante van de demper [Ns/m]	
c_{cr}	= kritische demping [Ns/m]	
c_d	= weerstandscoefficiënt	
c_n	= rekenwaarde voor homogene vergelijking	
C	= constante factor [verg. 2.9 t/m 2.12]	
D	= damping ratio	
D_{gem}	= de gemiddelde damping ratio over meerdere metingen	
E	= elasticiteitsmodulus [N/m ²]	
F	= frequentie [Hz]	
f_1	= eerste eigenfrequentie [Hz]	
f_1	= eigenfrequentie van de demper [Hz] [verg. 2.32d]	
f_2	= eigenfrequentie van de schoorsteen [Hz] [verg. 2.32d]	
F_d	= luchtwrijving [N]	
F_w	= rolwrijving [N]	
F_z	= gewicht [N]	
k	= veerconstante [N/m]	
k_1	= veerconstante demper [N/m]	
k_2	= veerconstante schoorsteen [N/m]	
K_t	= vervangende veerconstante [N/mm]	
m	= massa [kg]	
m_1	= massa demper [kg]	
m_2	= massa schoorsteen [kg]	
N_m	= aantal metingen	
N_s	= aantal schaaltes	
N_t	= aantal trillingen	
P_2	= kracht op de schoorsteen [N]	
P_1	= kracht op de demper [N]	
r	= root van een hulpvergelijking	
r	= straal [mm]	
S	= getal van Strouhal	
t	= tijd [s]	
T_0	= periode van een volledige oscillatie [s]	
T_n	= verlopen tijd na 'n' trillingen [s]	
t_n	= tijdstip op de na 'n'trillingen [s]	
t_w	= wanddikte schoorsteen [m]	
$\tilde{\nu}$	= coëfficiënt van Poisson	
v	= snelheid [m/s]	
v_c	= kritische windsnelheid [m/s]	
v_{gem}	= gemiddelde snelheid [m/s]	

x	= uitslag als variabele van de tijd [m]
$\dot{x}$	= eerste afgeleide naar de tijd van de uitslag [m/s]
$\ddot{x}$	= tweede afgeleide naar de tijd van de uitslag [m/s ²]
x_1	= uitslag van de demper [mm]
x_2	= uitslag van de schoorsteen [mm]
y	= rekenwaarde voor homogene vergelijking
W	= arbeid [J]
α	= rekenwaarde homogene vergelijking
β	= rekenwaarde homogene vergelijking
δ	= dempingcoëfficiënt
δ_{gem}	= gemiddelde dempingcoëfficiënt op basis van meerdere metingen
ΔE_p	= verschil in potentiële energie ten opzichte van de evenwichtspositie [J]
Δh_n	= hoogteverschil in de uiterste stand na 'n' trillingen [mm]
Δx_n	= afgelegde weg van de massa na 'n' trillingen [mm]
θ	= hoek van de uitslag [rad]
λ	= Logaritmisch decrement
λ_{gem}	= Gemiddelde logaritmisch decrement op basis van meerdere metingen
ρ'	= soortelijke massa [kg/m ³]
ω_0	= hoeksnelheid [rad/s]

1 Inleiding

1.1 Bedrijfsprofiel

Bos Nieuwerkerk is een producent van industriële schoorstenen. Het is een familiebedrijf dat is opgericht in 1973. Ten tijde van de oprichting van de firma, werd er in de glastuinbouw door veel tuinders overgestapt van oliegestookte installaties, op gas. De gemetselde schoorstenen, die toentertijd veelal in gebruik waren, bleken echter niet bestand tegen de rookgassen, waardoor er de noodzaak ontstond om de schoorstenen van staal uit te voeren. Bos Nieuwerkerk kon hier goed op inspelen. Ondertussen is het bedrijf gegroeid tot een middelgroot productiebedrijf, dat zich naast schoorstenen ook bezighoudt met kanaalwerk en warmtewisselaars. Afnemers van de schoorstenen variëren van bedrijven in de tuinbouw, utiliteitsbouw en (petrochemische)industrie. Bos Nieuwerkerk beschikt naast de productieruimte ook over een engineering afdeling. Er zijn ongeveer dertig mensen in dienst.

1.2 Aanleiding om een demper toe te passen

Objecten die worden blootgesteld aan dynamische krachten¹ kunnen (als deze krachten voldoende groot zijn) in beweging raken. De beweging die ontstaat heeft de eigenschap van een trilling of vibratie. Dit is voor te stellen als een snaar van een muziekinstrument. Als het object slechts een enkele keer wordt aangestoten zal de vibratie in de loop der tijd steeds kleiner worden. Dit fenomeen heet demping. In een theoretische situatie waarin geen demping plaatsvindt zou het object onverminderd blijven doortrillen (totdat een eventuele nieuwe kracht de trilling actief zou blokkeren).

De mate waarin een object vibreert (De amplitude van de trillingen en het aantal trillingen) blijkt grote invloed te hebben op de levensduur. Dit komt doordat een trilling leidt tot een wisselende spanning. Schoorstenen zijn voorbeelden van objecten die dynamisch worden belast. De invloed van de wind zorgt ervoor dat een schoorsteen gaat trillen. Te veel trillingen veroorzaken dus een onacceptabele verminderde levensduur, dit wordt in de onderstaande tekst goed omschreven:

“Een schoorsteen heeft, indien er geen specifieke maatregelen worden getroffen, een zeer geringe demping. Dit heeft tot gevolg, dat de optredende krachten ten gevolge van een zogenaamde vortex shedding (loslaten wervelingen), nauwelijks worden gedempt. Het probleem is dat de bovengenoemde krachten met een bepaalde frequentie, ten opzichte van de windrichting, afwisselend naar links en naar rechts werken. Deze frequentie wordt bepaald door de diameter van de schoorsteen en de heersende windsnelheid. Indien de frequentie samenvalt met de eigenfrequentie van de schoorsteen (bij de zogenaamde kritische windsnelheid), dan kan ten gevolge van de geringe demping de slingering en de daarbij optredende materiaalspanningen, zo groot worden dat er vermoeiingsverschijnselen optreden.” Bos Nieuwerkerk BV, 2009 (1)

¹ Dynamische krachten kunnen worden omschreven als een kracht waarvan de grootte in de tijd varieert.

Objecten hebben (door interne wrijving) van nature een dempende werking op vibraties. In de praktijk blijkt deze demping echter niet altijd toereikend. Doordat er veelal situaties voorkomen waarbij een object niet één enkele keer wordt aangestoten, maar bijvoorbeeld met enige regelmaat aan een dynamische kracht wordt blootgesteld. In dat geval kan de kracht ertoe leiden dat een voorwerp in de natuurlijke frequentie gaat trillen.² Om dat verschijnsel te voorkomen wordt er vaak gekozen om een extra demper toe te passen.

1.3 Opdrachtschrijving

Schoorstenen zijn producten die op maat worden gemaakt. Tijdens de ontwerpfase worden sterkteberekeningen van de schoorsteen gemaakt. Door de specialistische aard van de schoorsteenbouw is er een speciaal programma ontwikkeld waarmee de schoorstenen kunnen worden doorberekend. Dit programma heet Chimney™. Met dit programma zijn de ingenieurs binnen Bos Nieuwkerk in staat om relatief snel de spanningen die in de schoorsteen optreden te bepalen. Mochten deze spanningen de maximaal toelaatbare spanningen overschrijden dan kunnen er maatregelen worden getroffen, voorbeelden van dergelijke maatregelen zijn:

- Het toepassen van tuidraden;
- Afsteuning aan een frame;
- Toepassen van een trillingsdemper;
- Aanpassen wanddiktes;
- Aanpassen voetconstructie.

Het toepassen van een trillingsdemper komt in de praktijk vaak voor. Er zijn twee type trillingsdempers die worden toegepast, op de werking van de dempers wordt in het verslag ingegaan. De type dempers die worden onderscheiden zijn de rolringdemper en de hydraulische demper. Van beide dempers kan met behulp van het programma Chimney™ de effectiviteit worden bepaald. De mate waarin een trilling wordt uitgedempt is hierin doorslaggevend. Dit effect wordt omschreven aan de hand van het logaritmisch decrement. (bron: van Kooten) (2)

Het hoofd van de technische afdeling, Ir. C. Bezemer, heeft twijfels over de correctheid van de demping (uitgedrukt in het logaritmisch decrement), dat het rekenprogramma Chimney™ bepaalt voor de rolringdemper. Daarom moeten deze berekeningen worden geverifieerd. Om het verschil tussen de werkelijkheid en de berekening te controleren moet een methode worden uitgewerkt. De opdracht is het controleren en (zo nodig) verbeteren van de rekenmethode die Chimney gebruikt om een rolringdemper door te rekenen. Daartoe moet eerst worden bepaald hoe de demping van een schoorsteen in theorie tot stand komt. Vervolgens kan worden berekend wat de demping in theorie zou moeten zijn. Daarnaast wordt er een proefopstelling gebouwd om te verifiëren of de theorie overeenkomt met de praktijk. De resultaten van dit onderzoek zullen worden vergeleken met de uitkomsten van Chimney™. Indien blijkt dat de uitkomsten onvoldoende overeenkomen, kan het programma worden gecorrigeerd.

De projectgrenzen van dit onderzoek zijn als volgt:

² De frequentie waarbij in het object een staande golf kan optreden.

- Er moet een proefopstelling worden ontworpen;
 - o De proefopstelling moet als bouwtekening worden aangeleverd, zodat de proefopstelling geproduceerd kan worden;
 - o In de proefopstelling moet de pendelmassa (gemakkelijk) te variëren zijn;
 - o De trillingsdemper wordt uitgevoerd met de materialen die voor Bos Nieuwerkerk (met de huidige faciliteiten) te bewerken zijn;
 - o De proefopstelling economisch uitvoeren;
 - o De metingen worden door de student zelf verricht, er moet een logboek en een duidelijke proefbeschrijving worden bijgehouden zodat de proeven herhaald kunnen worden;
 - o De resultaten van de metingen worden gebruikt om het logaritmisch decrement te berekenen;

Functionele voorwaarden proefopstelling

- Nauwkeurige meetresultaten [in ieder geval op de mm nauwkeurig meten]
- Goed afleesbare meetresultaten [in ieder geval op de mm nauwkeurig afleesbaar]
- Realistische meetresultaten [zo goed mogelijk laten overeenkomen met de werkelijkheid]
- Metingen kunnen uitvoeren met verschillende rolringdemper gewichten [massa 10-80 kg]
- Metingen kunnen uitvoeren met verschillende type schaaltsjes [schaaltsjes uitwisselbaar]
- Gegevens over de eigenfrequentie van de schoorsteen (schoorsteen als systeem zonder demper) worden als bekend verondersteld;
- Het logaritmisch decrement moet worden omschreven als functie van de variabelen m en k
- In de literatuurstudie hoeft alleen de vrijstaande schoorsteen te worden beschouwd;
- De resultaten van het onderzoek worden door de student (in overleg met de opdrachtgever) in het bestaande rekenprogramma geïmplementeerd.

1.4 Opbouw rapport

Deze rapportage begint bij de oriëntatie. De oriëntatie bestaat uit een literatuurstudie, naar de noodzaak om trillingsdempers toe te passen (hoofdstuk 2.1), vervolgens wordt de werking van de trillingsdemper omschreven. Hierna wordt stilgestaan bij het verschil tussen de hydraulische trillingsdemper en de rolringdemper. Vervolgens wordt geanalyseerd hoe de huidige rekenmethode, met behulp van het rekenprogramma de gebruiker in staat stelt om een trillingsdemper te kiezen voor een schoorsteen. (Hoofdstuk 2.2). In de laatste paragraaf van de oriëntatie wordt de probleemstelling opnieuw geanalyseerd op basis van de inzichten die tijdens de oriëntatie zijn verworven. De essentie van dit hoofdstuk, is het omschrijven van de methode die gebruikt gaat worden om de opdracht uit te voeren. (Hoofdstuk 2.3)

Het volgende deel van de rapportage is de analyse. De informatie die niet tijdens de literatuurstudie verkrijgbaar was, wordt hier onderzocht. Daarnaast wordt de rekenmethode die tijdens de oriëntatie is beschreven uitgewerkt. In dit hoofdstuk wordt ook het ontwerpproces van de proefopstelling in beeld gebracht. Hierna wordt het gerapporteerd hoe de meetresultaten zijn verwerkt. Aan de hand

van de meetresultaten wordt berekend wat de demping van de rolringdemper is. Hierna kan het effect van het gewicht en de straal van de demper op de demping worden geanalyseerd. Het gevonden verband kan worden gebruikt om de huidige rekenmethode te controleren.

In hoofdstuk 2.1.5 is toegelicht hoe de schoorsteen en de demper samen een systeem vormen, en in hoofdstuk 2.1.4 is aangetoond dat het mogelijk is om aan de hand van het logaritmisch decrement te bepalen wat de demping van een hydraulische trillingsdemper is. Als de demping van de trillingsdemper bekend is, kan het gedrag (uitslag, optredende spanningen etc.) van het gehele systeem van de schoorsteen en demper worden bepaald. Op basis van deze informatie berekent Chimney™ het effect van de demper die wordt toegepast (zoals omschreven in hoofdstuk 2.2). Er wordt gecontroleerd of de demping die door Chimney wordt berekend overeenkomt met de onderzoeksresultaten.

In de hoofdstukken 2.1.6 en 2.1.7 is vastgesteld dat de hydraulische trillingsdemper en de rolringdemper van elkaar verschillen. In die zin dat een rolringdemper geen veer of demper heeft. Het ontbreken van deze factoren zal de wiskundige benadering van de trillingsdemper **vergelijking 2.15** beïnvloeden. Er zal moeten worden nagegaan in hoeverre het deze vergelijking kan worden gebruikt om de rolringdemper te omschrijven. [Analyse van de rolringdemper]

In hoofdstuk 3.1 wordt aangetoond hoe de berekeningen die op de hydraulische demper van toepassing zijn kunnen worden aangepast zodat deze ook kunnen worden gebruikt voor de rolringdemper.

Hierna wordt, in hoofdstuk 4.1 de het ontwerpproces van de proefopstelling behandeld. Vervolgens wordt de verwerking van de meetresultaten besproken (hoofdstuk 5), en worden de resultaten van deze resultaten geanalyseerd (hoofdstuk 5.2).

Tijdens het onderzoek wordt de volgende hoofdvraag beantwoord:

In hoeverre kloppen de berekeningen die Chimney maakt met betrekking tot de demping voor rolringdempers?

De deelvragen die deze hoofdvraag helpen te beantwoorden zijn omschreven in de literatuurstudie.

Een schoorsteen wordt blootgesteld aan de wind. Deze windkracht is dynamisch. Indien deze windkracht voldoende groot is, kan deze ertoe leiden dat de schoorsteen gaat bewegen. Deze beweging heeft de kenmerken van een trilling of vibratie. De schoorsteen functioneert immers als een massa-veer-demper-systeem: De constructie van de schoorsteen functioneert als een veer. De interne wrijving van de schoorsteen heeft hetzelfde effect als een demper, dit systeem is overigens ondergedempt. De eerder genoemde dynamische windkrachten en de daaruit volgende vibraties, kunnen leiden tot een onacceptabele combinatie van spanning en belastingwisselingen. Deze combinatie kan de levensduur van de constructie verminderen.

Tijdens deze oriëntatie worden de volgende kernvragen gesteld:

- Wat is een rolringdemper?
 - Wat is een reden om een trillingsdemper toe te passen?
 - Hoe functioneert een trillingdemper?
 - Hoe functioneert een trillingsdemper in combinatie met een schoorsteen?
 - Wat is een reden om een rolringdemper toe te passen?
 - Hoe ziet een trillingsdemper er uit?
 - Hoe ziet een rolringdemper er uit?
 - Hoe functioneert een rolringdemper?
 - Hoe functioneert een rolringdemper in combinatie met een schoorsteen?

Het beantwoorden van de bovenstaande vragen geeft een goede basis om de werking van het rekenprogramma te analyseren. Dit gebeurt aan de hand van de volgende vragen:

- Welke methode kan er gebruikt worden om te analyseren of de berekening van de dempingsresultaten van Chimney™ overeenkomen met de proefresultaten?
 - Hoe functioneert Chimney™?
 - Hoe kunnen de dempingsresultaten van Chimney™ worden geverifieerd?

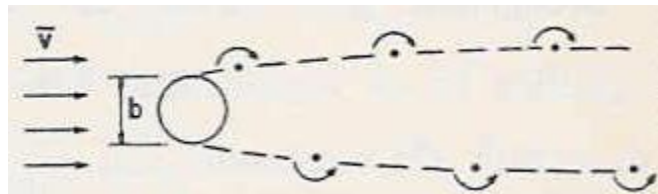
2.1 Literatuurstudie van de rolringdemper

2.1.1 Doel van een trillingsdemper

Een demper wordt gebruikt om een externe kracht op een object uit te dempen. Deze energievernietiging is het effect van de demper die een kracht uitoefent in de tegengestelde richting van de verplaatsing. Deze tegengestelde kracht gaat de beweging dus tegen. Als de demper goed is gekozen, zal de beweging (trilling) van de schoorsteen uitdempen, zodat de schoorsteen niet in de eigen frequentie zal geraken en niet aan onnodig veel wisselspanning wordt blootgesteld.

2.1.2 Reden om een demper toe te passen

“De wisselwerking tussen de luchtstroom en een slanke hindernis kan regelmatige schommelingen haaks op de windrichting ten gevolge hebben.” Vandepitte, 2003 (3)



Figuur 1 Het ontstaan van wervels ten gevolge van de wind

Dit kan als volgt worden verklaard: Bij een wind die langs een slanke constructie werkt, ontstaan aan de zijkanten wervels. Deze wervels ontstaan (bij gelijkblijvende windsnelheid) met regelmaat, afwisselend aan beide kanten. Bij het loslaten van de wervelingen ontstaat plaatselijk een onderdruk. Deze onderdruk heeft een aanzuigende werking op de constructie. Hierdoor wordt de constructie haaks op de stroomrichting van de wind belast. De interval (frequentie) waarmee deze belasting optreedt is gelijk aan (bron Vandepitte):

$$f = \frac{S v}{b} \quad [2.1]$$

Hierin is f de frequentie [Hertz], b de diameter [m] van het bovenste eenderde deel van de schoorsteen, S het getal van Strouhal [dimensieloos] en v de windsnelheid [m/s]. Het getal van Strouhal is gegeven in NEN-EN-1991-1-4 en is gelijk aan 0,18. Als de frequentie f , samenvalt met de eigenfrequentie van de schoorsteen f_1 , treedt er resonantie op. De eerste eigenfrequentie kan berekend worden met (bron Vandepitte):

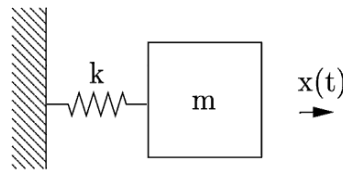
$$f_1 = 0,492 \sqrt{\frac{t_w^3 E}{\rho' (1 - \tilde{\nu}^2) b^4}} \quad [2.2]$$

Hierin is t de wanddikte [m], E de elasticiteitsmodulus [N/m²], ρ' de soortelijke massa [kg/m³] en $\tilde{\nu}$ de coëfficiënt van Poisson. De windsnelheid waarbij de belastingsinterval ten gevolge van de loslatende wervels overeenkomt met de eigenfrequentie van de schoorsteen is de kritische windsnelheid (v_c). Deze wordt berekend met (bron Vandepitte):

$$v_c = \frac{b f_1}{S} \quad [2.3]$$

Om een demper in combinatie met de schoorsteen goed te kunnen analyseren, wordt eerst alleen de demper beschouwd. De wiskundige benadering is gebaseerd op het werk van; van Kooten (2) en Stewart (4).

Het functioneren van een demper kan worden omschreven aan de hand van een vergelijking voor een massa-veer-demper-systeem. Daartoe wordt eerst het gedrag van een massa-veer-systeem, zonder demper beschreven.



Figuur 2 massa-veer-systeem

Zoals aangegeven bestaat er in de praktijk geen massaveersysteem zonder damping. Dit komt door de luchtweerstand die een massa normaalgesproken ondervindt en de materiaaldamping die optreedt ten gevolge van de interne wrijving in de veer. Als een massa van een massaveersysteem buiten de evenwichtspositie wordt gebracht en vervolgens wordt losgelaten, en als de luchtweerstand en materiaaldamping buiten beschouwing worden gelaten, kan de verplaatsing van de massa met een sinusoïde worden beschreven met **vergelijking 2.4** (bron Stewart):

$$x = a \cos \omega_o t \quad [2.4]$$

Hierin is x de afstand ten opzichte van de evenwichtspositie [m], a is de amplitude [m].

Verder is de hoeksnelheid ω_o [rad/s] te berekenen met $\omega_o = \sqrt{\frac{k}{m}}$ [2.5]

Hierin is de veerconstante k [N/m] en de massa m [kg].

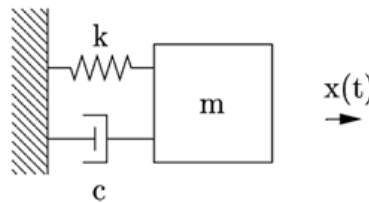
Uit ω_o volgt de eigen frequentie van een systeem; $f_o = \frac{\omega_o}{2\pi}$ [2.6]

hieruit volgt dat de tijd tussen twee opeenvolgende pieken gelijk is aan; $t_{n+1} - t_n = 2\pi/\omega_o$ [2.7]

waarbij de pieken steeds dezelfde amplitude zullen hebben, immers er vindt in dit systeem geen damping plaats.

Als de demping niet buiten beschouwing wordt gelaten, spreekt men van een massa-veer-demper-systeem. Een dergelijk systeem kan worden benaderd als een homogene vergelijking van de tweede orde. Een dergelijke vergelijking heeft de vorm van (bron Stewart):

$$y = Ax'' + Bx' + Cx = 0 \quad [2.8]$$



Figuur 3 massa-veer-demper-systeem

Hierin zijn A, B en C constante factoren. Deze vergelijking wordt opgelost door de homogene vergelijking om te schrijven naar een zogenaamde hulpvergelijking (bron Stewart):

$$Ar^2 + Br + C = 0 \quad [2.9]$$

Het oplossen van deze formule geeft de uitkomst van de r , de zogenaamde wortel. Hiervoor kan in het algemeen de ABC-formule worden gebruikt (bron Stewart).

$$r_{1,2} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$$

De uitkomst van r kan in drie categorieën worden ingedeeld. De uitkomst kan bestaan uit twee reële getallen, r kan één reële uitkomst hebben en r kan een imaginaire waarde hebben. Afhankelijk van die uitkomst van r , zijn er een drietal vergelijkingen mogelijk om y te beschrijven:

Tabel 1 beschrijving van y , afhankelijk van de uitkomst van r (bron: Stewart)

r_1, r_2 reëel en ongelijk	$y = c_1 e^{r_1 x} + c_2 e^{r_2 x}$
$r_1 = r_2 = r$	$y = c_1 e^{rx} + c_2 x e^{rx}$
r_1, r_2 complex (imaginair); $\alpha \pm i\beta$	$y = e^{\alpha x} (c_1 \cos \beta x + c_2 \sin \beta x)$

c_1 en c_2 kunnen worden bepaald als de uitslag $y(t)$ op bepaalde momenten bekend is. In het derde geval volgen de waardes van α en β uit de onderstaande vergelijkingen (bron: Stewart):

$$\alpha = -\frac{B}{2A} \quad [2.11]$$

$$\beta = \frac{\sqrt{4AC - B^2}}{2A} \quad [2.12]$$

Deze algemene beschrijvingen kunnen worden toegepast voor het systeem van een massa-veer-demper-systeem. Situatie drie, treedt alleen op als het systeem ondergedempt is. In de praktijk is een schoorsteen (zelfs als deze met een demper is uitgevoerd) ondergedempt. Het doel van een demper is immers niet het volledig tegengaan van een trilling, maar ervoor zorgen dat de optredende wisselspanning en uitwijking binnen toelaatbare grenzen blijft.

De krachtenbalans ziet er als volgt uit (bron Stewart en van Kooten):

$$F = Mx'' + Cx' + Kx = 0 \quad [2.13]$$

Deze formule heeft dezelfde vorm als de algemene homogene vergelijking [2.8], hierin is:

- Kx : De kracht ten gevolge van de veerconstante,
immers K = veerconstante [N/m] en x = uitrekking [m]
- Cx' : De kracht ten gevolge van de demper,
Immers C = dempingfactor [Ns/m] en x' = de snelheid [m/s]
- Mx'' : De kracht ten gevolge van de traagheid,
Immers M = massa [kg] en x'' = de acceleratie [m/s²]

Dit betekent dat de uitkomsten van **Tabel 1** dus te herleiden zijn tot een massa-veer-demper-systeem. Het gedrag van een dergelijk systeem is met een vergelijking te omschrijven. Uit **Tabel 1** en **vergelijking [2.13]** volgt (bron: van Kooten):

$$x = e^{\alpha t}(a_1 \cos \beta t) \quad [2.14]$$

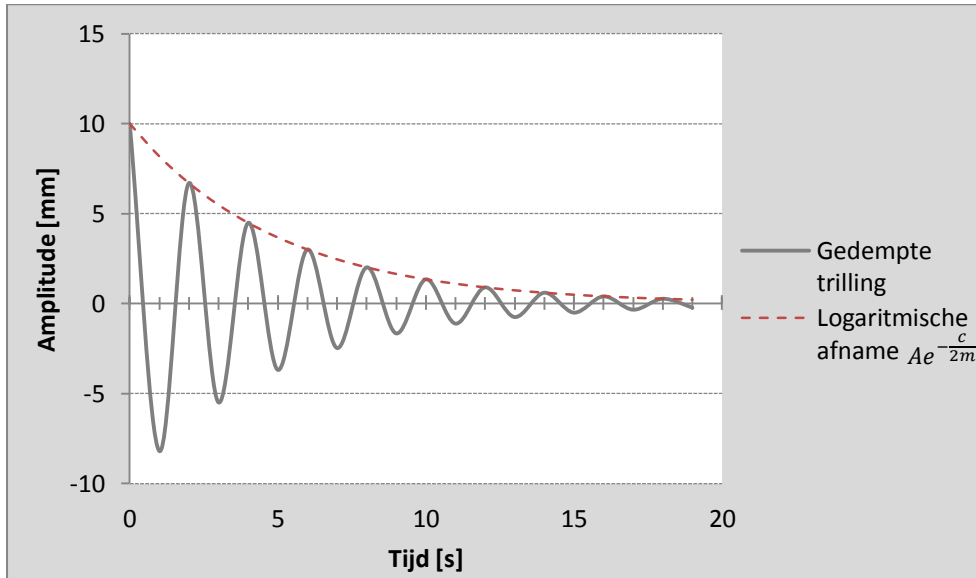
Vergelijking [2.14] geeft dus de beschrijving van de uitwijking van de massa van een massa-veer-demper-systeem ten opzichte van de tijd [s]. Hierin staan de termen α en β , die in **vergelijking [2.11]** en **[2.12]** zijn omschreven. Nu kan er aan de waardes voor A , B en C in **vergelijking [2.9]** de waarde respectievelijk m , c en k worden gekoppeld. Hier gaat de volgende paragraaf op in. **Vergelijking [2.14]** wordt herschreven tot (bron: van Kooten):

$$x = e^{\frac{-c}{2m}t} \left(a_1 \cos \sqrt{\frac{k}{m}} t \right) \quad [2.15]$$

Van deze sinusöide is de hoeksnelheid [rad/s] te berekenen aan de hand van de onderstaande vergelijking (bron: Stewart):

$$\omega_0 = \frac{\sqrt{4mk - c^2}}{2m} \quad [2.16]$$

Vergelijking [2.15] omschrijft een gedempte trilling. De demping ontstaat doordat de factor $e^{-\frac{c}{2m}t}$ kleiner wordt naarmate t groter wordt. (In de loop van de tijd nadert deze factor 0). Een voorbeeld van een dergelijk gedempte trilling staat in **Figuur 4**.



Figuur 4 Verloop van een gedempte trilling

Er zijn meerdere manieren om de demping van de trilling te omschrijven (bron: van Kooten):

- Dampingcoëfficiënt δ zodat $x = Ae^{-\frac{c}{2m}t} = Ae^{-\delta t}$ [2.17]

- Dempverhouding [%] $D = \frac{c}{c_{cr}} = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{a_n}{a_{n+1}}$ [2.18]

- Logaritmisch decrement λ zodat $\frac{a_2}{a_1} = e^{-2\pi\frac{c}{c_{cr}}} = e^{-\lambda}$ [2.19]

Hierin zijn

c demping [Ns/m]

c_{cr} kritische demping [Ns/m]

t tijd [s]

m massa [kg]

De kritische demping in deze formule is gelijk aan (het eerste gedeelte van deze vergelijking volgt uit van Kooten, herschrijven van deze vergelijking geeft het tweede deel):

$$c_{cr} = 2\sqrt{km} = \frac{2k}{\omega_0} \quad [2.20]$$

Vergelijking [2.17] volgt uit **vergelijking [2.15]**. Aan de hand van deze vergelijking kan heel duidelijk de afname van de amplitude worden geplot. Aan de hand van de dempverhouding kan de daadwerkelijke demping c worden berekend (bron: van Kooten):

$$c = c_{cr} \frac{1}{2\pi} \ln \frac{a_n}{a_{n+1}} \quad [2.21]$$

Het is mogelijk om de dempingcoëfficiënt δ te berekenen op basis van de amplitudeverschillen. Er dient dan wel rekening te worden gehouden met de tijd van één periode [s]. De formule hiervoor is geschreven op basis van (bron: van Kooten):

$$\delta = \frac{\ln\left(\frac{a_n}{a_{n+1}}\right)}{T_0} \quad [2.22]$$

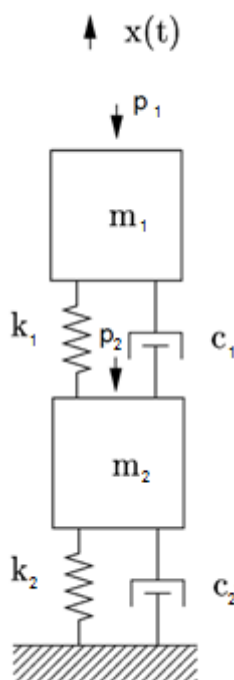
Zodat de logaritmische afname van de amplitude grootte (zoals in **vergelijking [2.17]**) kan worden geplot als (zoals blijkt uit **Figuur 4**):

$$x = Ae^{-\frac{\ln\left(\frac{a_n}{a_{n+1}}\right)}{T_0}t} \quad [2.23]$$

Samenvattend:

Aan de hand van de bewegingen van de massa, kan veel informatie over het massa-veer-demper-systeem worden verkregen. Er zijn meerdere manieren om de demping van een trilling to omschrijven: De dempingcoëfficiënt, de dempverhouding en het logaritmisch decrement. Deze laatste kan worden bepaald aan de hand van de amplitude van twee trillingen. Als de massa en veerconstante van een systeem bekend zijn, kan aan de hand van het logaritmisch decrement de demping worden bepaald.

In **hoofdstuk 2.1.4** is alleen het systeem van de trillingsdemper geanalyseerd. Hierbij is de wederzijdse invloed van de schoorsteen en de trillingsdemper buiten beschouwing gelaten. Het vorige hoofdstuk geeft dus nog geen volledige weergave van het functioneren van de trillingsdemper (immers een demper functioneert in het systeem van een demper en een schoorsteen.) Om het volledige systeem te beschrijven, moet dus ook de schoorsteen worden beschreven. Het blijkt dat de schoorsteen zelf ook functioneert als een massa-veer-demper-systeem: Een schoorsteen wordt door de wind elastisch vervormd (veer). Door interne wrijving, zogenaamde materiaaldemping, dempt een trilling in de loop der tijd uit (damping). Deze demping is wel laag, en blijkt ontoereikend om te voorkomen dat een schoorsteen in de natuurlijke frequentie gaat trillen, indien de kritische windsnelheid optreedt. In feite is een demper in een schoorsteen, dus een in seriegeschakelde massa-veer-demper-systeem zoals in **Figuur 5**.



Figuur 5 serie geschakelde massa-veer-demper-systemen

De krachten P_2 en P_1 uit **Figuur 5** kunnen met de volgende vergelijkingen worden omschreven. (Bron: van Kooten)

$$P_1 = m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + c_1 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) + k_1 (x_1 - x_2) \quad [2.24]$$

$$P_2 = m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + c_2 \left(\frac{dx_2}{dt} \right) - c_1 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) + k_2 x_2 - k_1 (x_1 - x_2) \quad [2.25]$$

Vergelijking 2.24 en 2.25 kunnen worden gebruikt om x_1 en x_2 te berekenen:

$$x_1 = \bar{x}_1 e^{i\omega t} \quad [2.26]$$

$$x_2 = \bar{x}_2 e^{i\omega t} \quad [2.27]$$

$$P_1 = \bar{P}_1 e^{i\omega t} \quad [2.28]$$

$$P_2 = \bar{P}_2 e^{i\omega t} \quad [2.29]$$

De volgende vergelijkingen worden verkregen door een gedeelte te herschrijven (bron: van Kooten).

$$|x_1|^2 = \frac{\{P_1(-m_2\omega^2 + k_1 + k_2) + P_2k_1\}^2 + \{P_1(c_1 + c_2)\omega + P_2c_1\omega\}^2}{\{(-m_1\omega^2 + k_1)(-m_2\omega^2 + k_1 + k_2) - k_1^2 - c_1c_2\omega^2\}^2 + \{c_1\omega(-m_2\omega^2 - k_1 + k_2) + (c_1 + c_2)\omega(-m_1\omega^2 + k_1)\}^2} \quad [2.30]$$

$$|x_2|^2 = \frac{\{P_1k_1 + P_2(-m_1\omega^2 + k_1)\}^2 + \{P_1c_1\omega + P_2c_2\omega\}^2}{\{(-m_1\omega^2 + k_1)(-m_2\omega^2 + k_1 + k_2) - k_1^2 - c_1c_2\omega^2\}^2 + \{c_1\omega(-m_2\omega^2 - k_1 + k_2) + (c_1 + c_2)\omega(-m_1\omega^2 + k_1)\}^2} \quad [2.31]$$

Bij de analyse van een schoorsteen omschrijft (2) de volgende situatie:

“The system m_2-k_2 is the schematization of the structure ($c_2 = 0$) and m_1-k_1 is the auxiliary mass-spring system with the damper c_1 ($P_1 = 0$). This system $m_1 - k_1 - c_1$ should be so designed that the amplitude of x_2 remains as small as possible.”

Hierin wordt de damping van de schoorsteen als 0 beschouwd. In deze situatie kan de kleinste uitslag van x_2 worden bewerkstelligd door de volgende verhouding na te streven. (In de praktijk zijn de gegevens van de schoorsteen k_2 en m_2 al bepaald, en kan de demper k_1 en m_1 worden aangepast.)

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{\frac{m_1}{m_2}}{\left(1 + \frac{m_1}{m_2}\right)^2} \quad [2.32]$$

Aan de hand van **vergelijking [2.6] en [2.32]** kan de beste verhouding tussen eigenfrequentie van de schoorsteen en de eigenfrequentie van de massa worden beschreven, allereerst wordt **[2.32]** herschreven:

$$k_1 \left(1 + \frac{m_1}{m_2}\right)^2 = k_2 \frac{m_1}{m_2} \quad [2.32a]$$

M_1 wordt naar de andere kant gebracht, en van beide kanten wordt de wortel genomen:

$$\sqrt{\frac{k_1}{m_1} \left(1 + \frac{m_1}{m_2}\right)^2} = \sqrt{\frac{k_2}{m_2}} \quad [2.32b]$$

Hieruit volgt de verhouding tussen de hoeksnelheden:

$$\omega_1 \left(1 + \frac{m_1}{m_2}\right) = \omega_2 \quad [2.32c]$$

Als beide kanten van de formule worden gedeeld door 2π volgt de ideale verhouding voor de frequentie van de demper f_1 en de sfrequentie van de schoorsteen f_2 .

$$f_1 \left(1 + \frac{m_1}{m_2}\right) = f_2 \quad [2.32d]$$

Verder omschrijft van Kooten, de ideale demping als:

$$\frac{c_{1i}}{c_{cr}} = \frac{\frac{m_1}{m_2}}{1 + \frac{m_1}{m_2}} \quad [2.33]$$

Hierin is de kritische demping (bron: Kooten (2)):

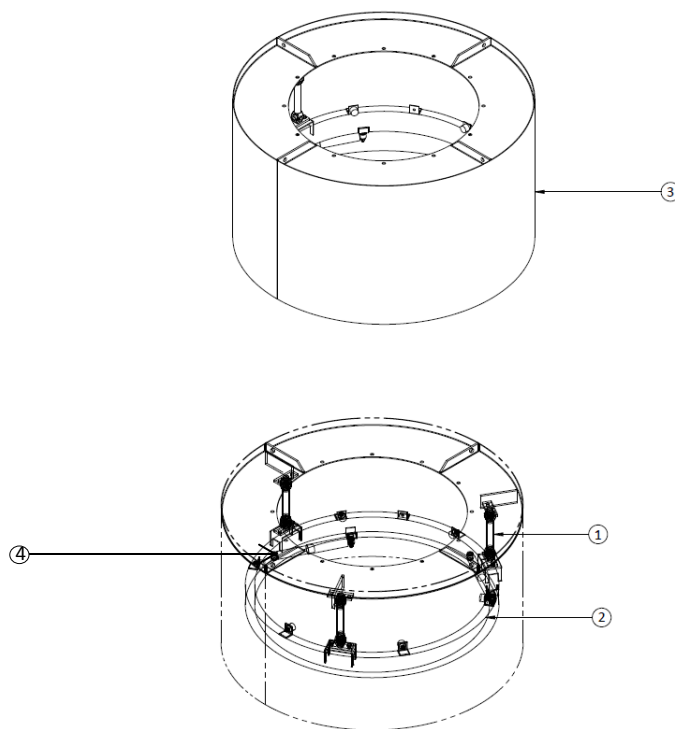
$$c_{cr} = 2\sqrt{km} \quad [2.34]$$

Dan is **vergelijking [2.34]** te herschrijven tot (bron: Kooten (2)):

$$c_{1i} = \frac{\frac{m_1}{m_2} 2\sqrt{k_1 m_1}}{1 + \frac{m_1}{m_2}} \quad [2.35]$$

Hieruit blijkt dus dat de ideale demping, afhankelijk is van de massa en de veerkracht van het systeem. De massa van een schoorsteen kan als bekend worden verondersteld. De massa, veerconstante en demping van de demper kunnen worden gekozen, zodat aan de voorwaarde van **[2.35]** wordt voldaan. In een systeem waarbij k_1 en c_1 niet bekend zijn, kunnen deze twee waarden worden bepaald aan de hand van het logaritmisches decrement.

In de literatuurstudie is tot nu toe aandacht besteed aan een massa-veer-demper-systeem dat gebruikt wordt om een schoorsteen te dempen. Dit omschreven systeem is een hydraulische trillingsdemper. De belangrijkste onderdelen van deze demper zijn de hydraulische dempers ④, de verbinding met de mantel ③, de massa ② en de pendellengtes ① (**Figuur 6**)



Figuur 6 Hydraulische trillingsdemper

Voor dit systeem is dus de beschouwing in **hoofdstuk 2.1.3** van toepassing. De hydraulische demper kan dus goed worden doorgerekend. De hydraulische trillingsdemper heeft twee nadelen: De demper heeft een hoge aanschafprijs en de hydraulische dempers ④ die worden gebruikt moeten na verloop van tijd vervangen worden.

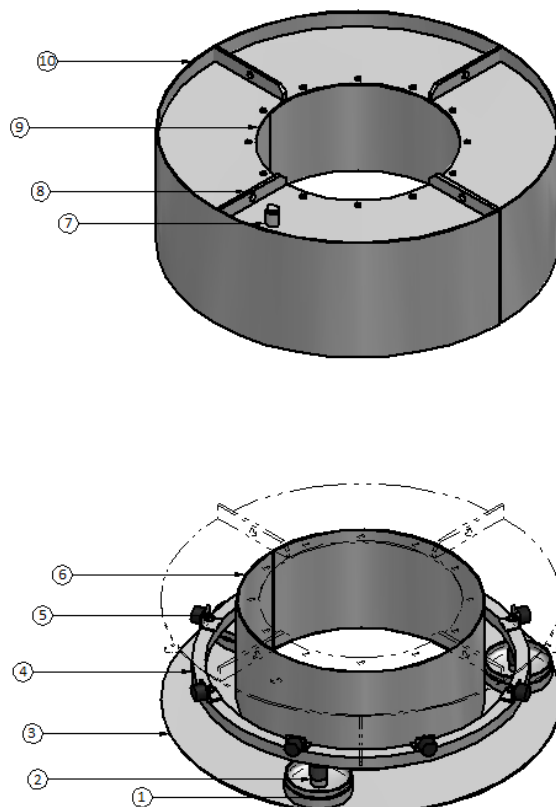
Een goedkoop alternatief voor de hydraulische trillingsdemper is de rolringdemper. Deze trillingdemper vervult dezelfde rol als de hydraulische demper. Deze demper zal ook aan de mantel worden gemonteerd waardoor een seriegeschakeld systeem ontstaat. De invloed van de demper op de schoorsteen kan worden omschreven **vergelijking [2.30] en [2.31]** De rolringdemper is goedkoper en er hoeft aan dit type demper in principe geen onderhoud te worden gepleegd. De rolringdemper bestaat uit een massa, waaronder een drietal kogelpotten is bevestigd. Deze potten kunnen in een drietal schaaltes rollen, waardoor de massa kan schommelen. De onderdelen in een rolringdemper worden in **hoofdstuk 2.1.7** benoemd. Het belangrijkste verschil tussen de hydraulische demper en de rolringdemper is het ontbreken van een veer en een “traditionele” demper. Hierdoor zullen de

berekeningen van **hoofdstuk 2.1.3** moeten worden aangepast. Deze aanpassingen zullen in **hoofdstuk 3.1** worden getoond. De functies van de verschillende onderdelen komen in **hoofdstuk 2.1.7** aan bod.

Het systeem van een rolringdemper is opgebouwd uit een aantal subsystemen. In dit hoofdstuk wordt besproken hoe het systeem van dit type demper functioneert en welke rollen de verschillende subsystemen daarbij hebben.

Bij het toepassen van een trillingsdemper wordt de dempingwaarde vergroot waarmee de optredende wisselspanningen beneden de vermoeiingsgrens blijven. Een rolringdemper is een trillingsdemper die hiervoor gebruikt zou kunnen worden. De dempende werking van een rolringdemper wordt bewerkstelligd doordat de demper een kracht uitoefent tegen de richting van de trilling in. Deze kracht is een gevolg van de massa traagheid van het dempergewicht. Aangezien de demper met een andere frequentie trilt dan de schoorsteen, zal de beweging van de demper de trilling van de schoorsteen tegengaan. (De ideale verhouding tussen de frequentie van de demper en de schoorsteen wordt omschreven in **vergelijking [2.32b]**). Vergeleken met de hydraulische trillingsdemper, is de rolringdemper een stuk goedkoper. Bovendien hoeft er aan een rolringdemper in principe geen onderhoud gepleegd te worden. De demper kan met meerdere schaaltes worden uitgerust, maar vanwege de kans op onnauwkeurigheden in de fabricage, zal de massa in de praktijk effectief over drie schaaltes het best worden verdeeld. Binnen Bos Nieuwkerk is daarom besloten dat de rolringdemper altijd met drie schaaltes wordt uitgevoerd.

In **Tabel 2** op de volgende pagina staan de verschillende functies van de schoorsteenonderdelen. Bovendien is de functie en de werking van de onderdelen kort omschreven. In **bijlage I** staat zijn de onderdelen van de rolringdemper groter in beeld gebracht.



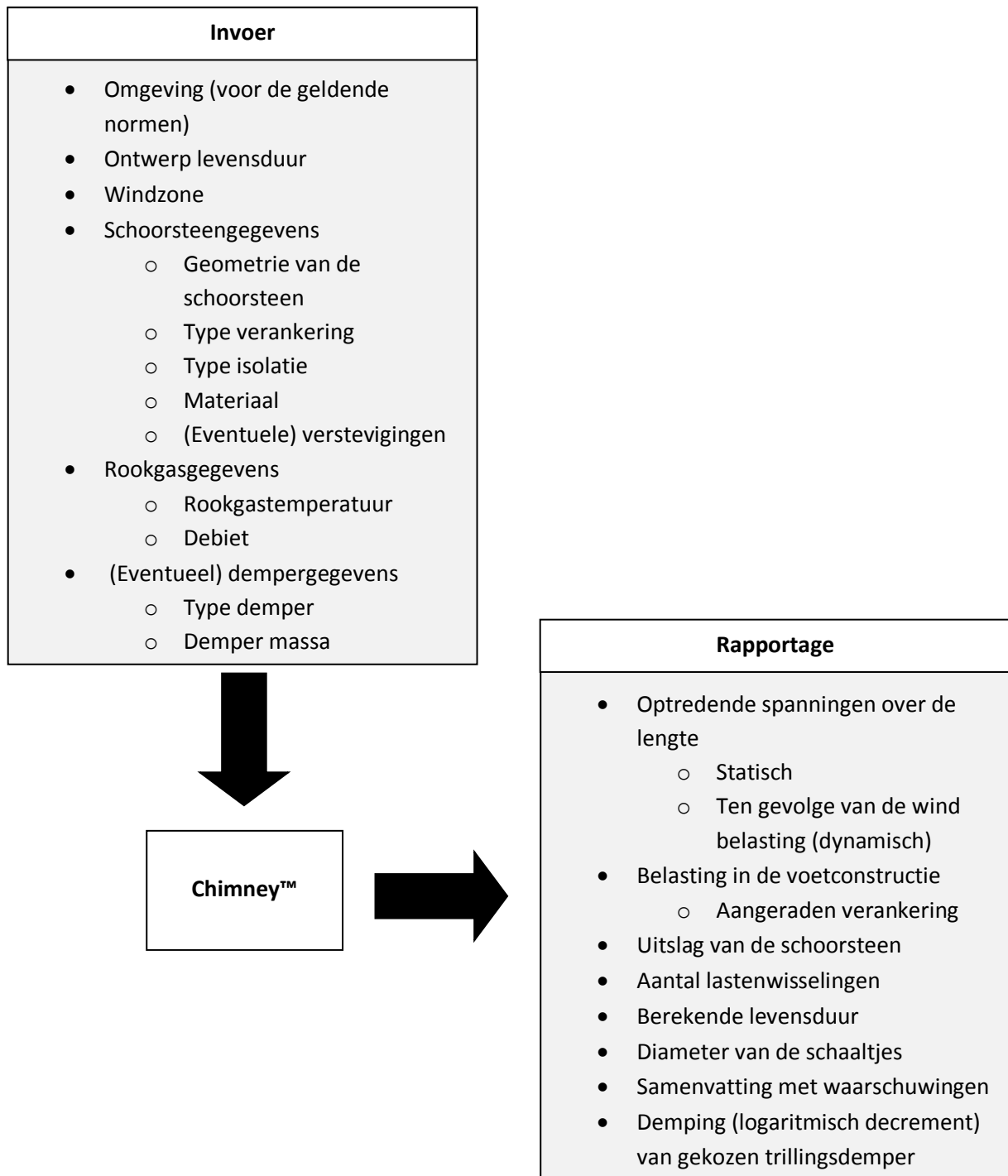
10	1	Buitenmantel demper
9	1	Bovenplaat
8	4	Hijsoog
7	1	Lassok
6	1	Binnenmantel
5	8	Stootrubber
4	1	Gewicht
3	1	Onderplaat
2	3	Kogelpot
1	3	Schaal
Posnr	Aantal	Benaming

Naam onderdeel	Functie	Werking
Hijsoog	Aan de hijsogen kan de demper worden opgetild	
Binnenmantel	Geleiding rookgassen	Sluit aan op de schoorsteenmantel
Stootrubber	Voorkomt beschadigingen indien het gewicht tegen de buitenmantel aanstoot	Rubbers absorberen de impact
Gewicht	Het gewicht zorgt voor de benodigde massa	Massatraagheid werkt tegen de richting van de trilling (dit is mogelijk doordat de kogelpot in de schaal glijdt)
Bodemplaat	Op de bodemplaat worden de schalen vastgezet. De bodemplaat zorgt dus ook voor de positionering van de schalen. Verder moet de bodemplaat zorgen voor een stijve afsteuning van de constructie	
Kogelpot	Het rollende steunpunt van de roller, zorgt tevens voor demping	Gelagerde bal rolt “vrij” door de schaal, de demping ontstaat ten gevolge van de wrijving
Schaal	In de schaal kan de kogelpot glijden (of rollen). Hierdoor kan het gewicht van de demper bewegen	In de schaal kan de kogelpot glijden (slingeren) hierbij treedt enige wrijving op (demping)
Lassok	De lassok kan worden gebruikt om een interne camera-inspectie uit te voeren	Voor de inspectie wordt gebruikgemaakt van een endoscoop. Onder normale omstandigheden is de opening gedicht met een stop

Tabel 2 Verschillende onderdelen rolringdemper

Een rolringdemper bestaat dus in essentie uit een bewegende massa. De beweging van de massa “slingert” in de schaal. Deze slingering werkt de gehele slingering van de schoorsteen tegen. Het wiskundig bewijs hiervan staat in **Hoofdstuk 3.1**. De massa zelf moet ook worden gedempt om te voorkomen dat deze blijft doorslingeren. De dempende werking van de rolringdemper ontstaat in de schaaltes.

Chimney™ is een rekenprogramma, ontwikkeld door Gerrit Verboom en Henk van Kooten, waarmee een schoorsteen kan worden doorgerekend. Het programma biedt de mogelijkheid om schoorsteengegevens in te voeren. Op basis van deze gegevens wordt een rapport gegenereerd. Hierin staat onder andere beschreven wat de optredende (wissel-)spanningen zullen zijn en of de beoogde levensduur haalbaar is. Hieronder staat een schematisch overzicht over de werking van de software.



Figuur 8 Schematische werking van Chimney™

Chimney™ is gebaseerd op geldende normen, zoals bijvoorbeeld de Eurocode. Binnen Nederland moet voor de bouw van schoorstenen worden voldaan aan de Eurocode en een groot aantal Europese normen. Speciale schoorsteennormen zijn EN1993-3-2 en de EN183084 serie. Bovendien is er een specifieke norm die betrekking heeft op de windbelasting: *NEN-EN 1991-1-4* (5), in andere landen kunnen andere normen van toepassing zijn. Zo geldt in de Verenigde Staten onder andere de ASME en de ASCE normen.

Daarnaast is het programma aangevuld met berekeningen die niet tot een norm zijn verwerkt. Zo wordt de dempingcoëfficiënt van de rolringdemper wel berekend, maar deze berekeningen staan niet in een norm vastgelegd. Chimney™ berekent de demping op basis van de volgende vergelijking, die in het verleden empirisch is bepaald door de ontwikkelaars van het programma:

$$D = 0,2 \left(\frac{N_s}{3} - \frac{m_1}{100} \right) \quad [2.36]$$

Hierin is N_s het aantal schaaltes van de rolringdemper en m_1 het dempergewicht [kg]. In **Vergelijking [2.18]** wordt deze dempverhouding volgens een andere methode berekend. Dit biedt een basis voor de controle van Chimney™, door **Vergelijking [2.36]** te vergelijken met **Vergelijking [2.18]**.

Het programma bepaalt de schaaldiameter (pendellengte), de massa wordt door de gebruiker ingevoerd, hieruit wordt het dempingsdecrement berekend.

Om de uitkomsten van Chimney™ te verifiëren zijn vergelijkwaardes nodig. Gezien de specialistische aard van de rolringdemper, zijn dergelijke waardes voor het logaritmisch decrement niet eerder gepubliceerd. Deze waarden zullen dus aan de hand van een eigen onderzoek bepaald moeten worden. De meest voor de hand liggende methode hiervoor is het opmeten van de uitslag van een losse rolringdemper. Hiertoe wordt een proefopstelling gebouwd, waarmee in een gecontroleerde omgeving kan worden opgemeten hoe de massa van een demper beweegt. De proefopstelling moet vergelijkbaar zijn met een rolringdemper, hierdoor bestaat er geen mogelijkheid om de opstelling geheel in te kopen. Om tot een werkzame proefopstelling te komen zal er een structurele werkwijze (methodisch ontwerpen) moeten worden toegepast. De meetresultaten die met de

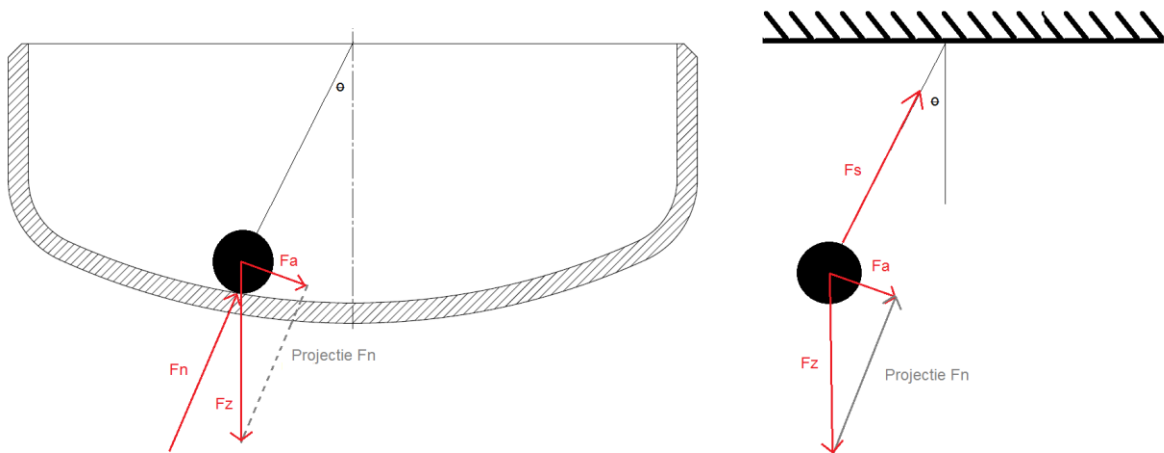
Methode/doel:

Proefopstelling, om de beweging van een rolringdemper na te meten. Aan de hand van de beweging van de proefopstelling kan de demping worden bepaald.

Methodisch ontwerpen, de proefopstelling moet goed functioneren. Om tot een goed ontwerp te komen wordt de methodisch ontwerpen werkwijze toegepast.

Verwerken meetgegevens, de meetgegevens zullen in een spreadsheetprogramma worden verwerkt. Hierdoor is het makkelijk om grote hoeveelheden data inzichtelijk te maken. Bovendien bieden dergelijke programma's de mogelijkheid om berekeningen met de gegevens uit te voeren, waardoor er minder handelingen hoeven plaats te vinden.

Een rolringdemper is geen traditioneel massa-veer-demper-systeem. De veer en de demper ontbreken namelijk. Er is wel een andere positiegebonden kracht, te weten; de zwaartekracht. Deze kracht zorgt ervoor dat de demper na een verplaatsing weer terugkeert naar de evenwichtstoestand. De snelheidsgebonden kracht ontbreekt, daar de rolwrijving niet afhankelijk is van de snelheid. De wrijving ontstaat voornamelijk ten gevolge van het rolcontact van de kogel over de binnenzijde van de schaal. In **bijlage II** wordt het proces van de wrijving uitgelicht. Het ontstaan van rolweerstand is een redelijk complex fenomeen waarbij een effect optreedt dat, in de tribologie, bekendstaat als hysteresis. In **bijlage III** wordt er licht geworpen op dit fenomeen. De beweging van de kogel in een schaal is vergelijkbaar met de beweging van een kogel aan een slinger. (**Figuur 9**) In de onderstaande situatie wordt de wrijving buiten beschouwing gelaten. In werkelijkheid is er wel sprake van enige wrijving. Door deze wrijving zal de rolringdemper ook daadwerkelijk een dempende functie vervullen.



Figuur 9 De overeenkomsten tussen de schaal en de slinger

De resultante kracht kan in beide situaties op dezelfde wijze worden bepaald. Voor deze berekening gelden de volgende voorwaarden:

$$r_{\text{schaal}} = l_{\text{slinger}}$$

$$\theta_{\text{schaal}} = \theta_{\text{slinger}}$$

De gebruikte massa (m) is in beide situaties gelijk

De resultante kracht die op de massa werkt is de kracht die zorgt voor de acceleratie van de bol. Deze kracht wordt F_a genoemd, en deze is te bepalen met (volgt uit **Figuur 9**):

$$F_a = \sin(\theta) F_z \quad [3.1]$$

hierin is, θ de hoek van de uitslag zoals in **Figuur 9**:

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{x}{r}\right) \quad [3.2]$$

F_z is het gewicht van de massa wordt in werkelijkheid opgevangen met drie kogelpotjes (**Figuur 7**), vandaar dat het gewicht wordt gedeeld door drie:

$$F_z = \frac{1}{3} mg \quad [3.3]$$

Vergelijking 3.1 kan dus worden herschreven tot:

$$F_a = \sin\left(\sin^{-1}\left(\frac{x}{r}\right)\right) \frac{1}{3} mg = \frac{mgx}{3r} \quad [3.4]$$

Deze F_a is dus de acceleratie kracht op de kogelpot in **Figuur 9**, de vergelijking geeft geen indicatie van de richting van de kracht maar wel van de grootte. Aangezien de situatie is gewijzigd ten opzichte van het massa-veer-systeem. Kan de periode van een volledige oscillatie worden beschreven met (bron:Rekenset,2015 (6):

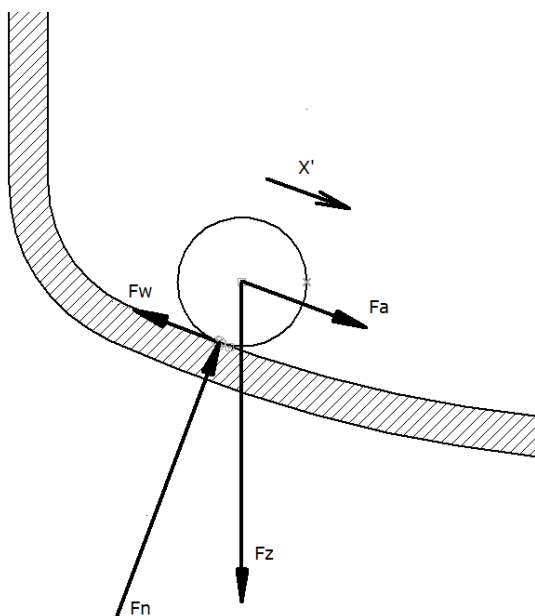
$$T_o = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad [3.5]$$

Als een slinger zonder enige vorm van damping uit evenwicht wordt gebracht, kan de amplitude worden omschreven met (bron: Stewart):

$$y = a \cos(\omega_o t) \quad [3.6]$$

In werkelijkheid zal de slingering gedempt worden dan wordt de vergelijking (bron: van Kooten):

$$y = e^{\lambda} a \cos(\omega_o t) \quad [3.7]$$



In deze laatste vergelijking komt het logaritmisches decrement, λ , voor. Deze factor moet dus onderzocht worden. Als de schaal in **Figuur 9** gedetailleerder wordt uitgewerkt (waarbij ook rekening wordt gehouden met de rolwrijving F_w) volgt **Figuur 10**.

Figuur 10 Gedetailleerd krachtenoverzicht

Uit **Figuur 10** en Newton's tweede wet van de natuurkunde kan worden afgeleid dat de versnelling kan worden omschreven met:

$$\ddot{x} = \frac{F_a - F_w}{M} \quad [3.8]$$

Hierin is de kracht F_a zoals bepaald in **vergelijking [3.4]** de weerstand F_w is evenredig met de normaalkracht. (Zoals omschreven in **bijlage II**). De grootte van F_n is afhankelijk van de positie van de kogel in de schaal. De kracht F_n zoals in **Figuur 10** kan worden benaderd met:

$$F_n = \cos(\theta) F_z \quad [3.9]$$

Met inachtneming van de onder **vergelijking [3.1]** en **[3.2]** bepaalde gegevens kan **vergelijking [3.9]** worden herschreven tot:

$$F_n = \cos\left\{\sin^{-1}\left(\frac{x}{r}\right)\right\} F_z \quad [3.10]$$

Hoewel er dus geen sprake is van een veer, kan de kracht F_n wel als een veerconstante worden benaderd. Daartoe moet de verhouding tussen de kracht F_a en de uitwijking y worden bepaald. In **bijlage IV** staat de verantwoording van de gehanteerde methode³. De vervangende veerconstante kan worden benaderd met:

$$K_t = \frac{mg}{r} \quad [3.11]$$

Van de proefopstelling kan de trillingstijd worden berekend afhankelijk van de pendellengte. Aangezien de straal van de schaal worden gezien als de lengte van de slinger. Uit **bijlage VI** komt de straal van de schaal 101,6 mm. Dat geeft een trillingstijd van 0,65 seconden. De proefopstelling is ook uitgevoerd met schalen met een straal van 152 mm, daarbij is de trillingstijd ongeveer 0,78 seconden.

$$T_o = 2\pi \sqrt{\frac{l}{9,81}} \quad [3.12]$$

$$T_o = 2\pi \sqrt{\frac{0,102}{9,81}} = 0,6500 \text{ [s]} \quad [3.12a]$$

$$T_o = 2\pi \sqrt{\frac{0,152}{9,81}} = 0,7821 \text{ [s]} \quad [3.12b]$$

De schaaldiameter moet zo worden gekozen, dat de verhouding tussen de eigenfrequentie van de schoorsteen en de eigenfrequentie van de demper overeenkomt met **vergelijking [2.32d]**

³ In **vergelijking [3.10]** wordt de luchtweerstand buiten beschouwing gelaten. Een beknopte toelichting staat in **Bijlage IV**.

Bij het uit positie brengen van de massa wordt potentiële energie aan het systeem toegevoegd. Als de demper wordt losgelaten, zal de massa heen en weer schommelen totdat alle (potentiële)energie is omgezet in warmte. Door na te gaan hoeveel energie er aan het systeem wordt toegevoegd (en later weer wordt onttrokken), kan worden bepaald hoeveel wrijvingsenergie er optreedt. Dit biedt een alternatieve rekenwijze om de damping te bepalen. De potentiële energie [KJ] kan worden omschreven met (bron: Rekenset (6)):

$$\Delta E_p = mg\Delta h_n \quad [3.13]$$

Hierin is Δh_n het hoogteverschil [mm] tussen de beginstand en de stand na 'n' trillingen. Deze waarde kan met geometrische berekeningen worden vastgesteld:

$$\Delta h_n = \left(r \left\{ \cos \left(\sin^{-1} \frac{x_n}{r} \right) - \cos \left(\sin^{-1} \frac{x_{max}}{r} \right) \right\} \right) \quad [3.14]$$

Hierin is r de straal van de schaaltes [mm] en x_{max} is de maximale uitwijking van de massa [mm]. Aangezien alle potentiële energie in warmte wordt omgezet, kan de gemiddelde wrijving [N] op basis van de afgelegde weg (bron: Rekenset (6)):

$$F_w = \frac{W}{\Delta x_n} = \frac{\Delta E_p}{\Delta x_n} \quad [3.15]$$

Hierin is de arbeid, of het verschil in potentiële energie in [KJ] en Δx_n de afgelegde weg [mm] na 'n' trillingen. De afgelegde weg wordt vastgesteld aan de hand van de metingen. De werkwijze hiervoor staat in **bijlage VII**.

$$c = \frac{F_w}{v_{gem}} \quad [3.16]$$

Aan de hand van **vergelijking [3.15]** kan de gemiddelde wrijving die optreedt in de rolringdemper worden berekend. Als deze wrijving bekend is, kan de damping worden uitgerekend aan de hand van **vergelijking [3.16]**. Deze rekenwijze is een alternatief voor de methode die in **vergelijking [2.18]**, **[2.19]** en **[2.21]** wordt gehanteerd. Beide rekenmethodes zullen in **hoofdstuk 5** verder worden uitgewerkt. Het gebruik van twee verschillende rekenwijzen dient als controlemechanisme.

De proefopstelling wordt gebruikt om het logaritmisch decrement te bepalen. Om dit te kunnen doen moet de amplitude van twee opeenvolgende uitslagen worden opgemeten. Met behulp van de proefopstelling moet dus ten minste de amplitude van twee opeenvolgende trillingen kunnen worden bepaald. Om deze functie te kunnen vervullen worden twee deelfuncties onderscheiden. De eerste deelfunctie is het bewegen van de massa, de tweede deelfunctie is het analyseren van de beweging. De proefopstelling zal ontworpen worden volgens de methode voor methodisch ontwerpen. Het doel van de opstelling kan worden samengevat als: *“Een proefopstelling die de beweging van de rolringdemper nabootst en daarmee de mogelijkheid biedt aan de onderzoeker om de beweging van de demper nauwkeurig te analyseren.”*

Het bewegen van de massa omvat de beweging van de massa, vergelijkbaar met de beweging van een “echte” rolringdemper. Het analyseren van de beweging omvat alles, wat nodig is om van de bewegende massa, twee opeenvolgende amplitudes op papier te kunnen zetten. Voordat de proefopstelling methodisch is uitgewerkt, is er een eerste principeschets gemaakt. Dit is gedaan, om knelpunten en eventuele knelpunten vooraf beter te kunnen inschatten. Deze schets is in **Figuur 11** zichtbaar.



Figuur 11 Principeschets proefopstelling

De principeschets is opgebouwd uit alle delen, van een rolringdemper, waarvan de functie samenhangt met de werking van de demper. De onderdelen staan genoemd in **Tabel 2** op pagina 27.

Opvallende knelpunten zijn:

- De massa, die is opgebouwd uit een gebogen staaf, is lastig te stapelen dus het variëren van de massa wordt hierdoor lastiger;
- De meetuitslag is lastig te zien, er moet een manier worden uitgewerkt om de uitslag goed te kunnen aflezen;
- De schaaltes kunnen nu te makkelijk verplaatsen, ze moeten worden vastgezet op een bodemplaat.

Met kennis van deze knelpunten kan worden overgegaan op het methodisch ontwerpen. Het is mogelijk om meerdere manieren te gebruiken om de uitwijking van de massa te analyseren. Zo zou ervoor kunnen worden gekozen om een zogenaamde bewegingssensor en datalogger te gebruiken, en daarnaast ook met de hand de uitslag op te meten. Twee onafhankelijke metingen, verkleint de kans op fouten. De proefopstelling zou dan uit drie onderdelen bestaan: De rolringdemper en twee methodes om de beweging te analyseren.

4.1 Methodisch ontwerpen voor proefopstelling

Hoofddoelstelling: Een proefopstelling die de beweging van de rolringdemper nabootst en daarmee de mogelijkheid biedt aan de onderzoeker om de beweging te analyseren.

Tabel 3 Ontwerp voorwaarden

Functioneel	Fabricage	Voorwaarden	Vast	Variabel	Wens
	✓	1. De proefopstelling moet binnen Bos Nieuwkerk gefabriceerd kunnen worden		✓	
	✓	2. De proefopstelling economisch uitvoeren		✓	
✓		3. Nauwkeurige meetresultaten		✓	
✓		4. Goed afleesbare meetresultaten	✓		
✓		5. Realistische meetresultaten	✓		
✓		6. Metingen kunnen uitvoeren met verschillende rolringdemper gewichten (massa variëren van 10 tot 80 kg met tussenstappen van 10 kg)	✓		
✓		7. Meteningen kunnen uitvoeren met verschillende type schaaltes		✓	

De variabele voorwaarden moeten nog worden afgebakend. Hiertoe worden, indien mogelijk, boven- en ondergrenzen omschreven. Voor de vaste voorwaarden geldt dat er aan deze voorwaarden absoluut moet worden voldaan. Zie hiervoor **Tabel 4** op de volgende pagina.

Tabel 4 Toelichting variabele ontwerpvoorwaarden

Voorwaarde	Toelichting	weegfactor
1. De proefopstelling moet binnen Bos Nieuwkerk gefabriceerd kunnen worden	Er wordt zoveel mogelijk gebruikgemaakt van onderdelen die binnen Bos Nieuwkerk gefabriceerd kunnen worden. Mocht een onderdeel niet intern te produceren zijn, dan wordt er gekeken naar andere partijen voor de levering van deze onderdelen	20%
2. De proefopstelling economisch uitvoeren	Bij elk onderdeel moeten de kosten worden afgewogen in de keuze. Niet alleen de prijs van een onderdeel speelt een rol, ook de eventuele kosten van de (noodzakelijke) arbeid. Bovendien moet er gekeken worden in hoeverre een onderdeel herbruikbaar is voor andere projecten. De proefopstelling mag maximaal €300,- kosten.	40%
3. Nauwkeurige meetresultaten	De meetresultaten moeten ten minste op 1 mm nauwkeurig afgelezen kunnen worden	40%
7. Meteningen kunnen uitvoeren met verschillende type schaaltes	De proefopstelling moet zo worden gefabriceerd dat er gemakkelijk andere schaaltes kunnen worden gebruikt. (Er bestaan verschillende type schalen bijvoorbeeld schalen met een andere wanddikte) Dit betekent dat de schaaltes niet-destructief gedemonteerd moeten kunnen worden	-

Toelichting weegfactor: Productie binnen Bos Nieuwkerk heeft de voorkeur, maar als het goedkoper is om een onderdeel in te kopen dan vervalt de noodzaak om het binnenshuis de vervaardigen. Verder is het wenselijk om de meest nauwkeurige meetresultaten te vergaren, hierbij mogen de kosten echter niet onbeperkt oplopen.

De hoofddoelstelling van de proefopstelling kan worden onderverdeeld in twee deelfuncties.⁴

1. *Metten van de uitwijking*
2. *Variëren van gewicht*

De eerste deelfunctie moet dus in ieder geval voldoen aan voorwaarden 4 en 5, bovendien moet er ook de optimale verhouding worden gezocht tussen voorwaarde 1, 2 en 3. Met het oog op de verificatie van de meetresultaten wordt overwogen om niet één enkele meetmethode toe te passen, maar om een tweetal meetmethodes toe te passen. Uiteraard moeten beide meetmethodes aan de bovengenoemde voorwaarden voldoen. In Tabel 5 staan de eisen en wensen voor de proefopstelling omschreven.

⁴ Er zijn eigenlijk meer deelfuncties te onderscheiden, maar de alternatieve werkwijzen hiervan zijn niet praktisch. Voorbeelden hiervan zijn: Positioneren schalen, bieden stevigheid, bieden evenwicht, bieden ondersteuning, bevestigmethode, centrering gewichten. Een gedeelte van deelfuncties worden al bewerkstelligd door het model van een rolringdemper als basis te gebruiken.

Proefopstelling		
Eis/Wens	Realiseren door	Moeilijkheden
De proefopstelling binnen Bos Nieuwkerk gefabriceerd fabriceren	Ontwerp met het oog op fabricage/montage.	
De proefopstelling zo economisch mogelijk uitvoeren	Waar mogelijk vermijden om dure meetapparatuur te kopen, gebruik maken van materiaal uit voorraad en beschikbare videoapparatuur (eigen digitale camera of telefoon),	Nauwkeurige afstandssensoren zijn duur, nauwkeurige meetapparatuur is duur.
Video analyse		
Goed afleesbare meetresultaten	Langs de slingerrichting afstandsmarkeringen aanbrengen Of met laser een projectie maken, langs de projectie markeringen aanbrengen	Aanbrengen afstandsmarkeringen; Voorspellen slingerrichting
Nauwkeurige meetresultaten	Meetresultaten op video vastleggen op hoge resolutie. De constructie moet voldoende stijf zijn om elastische beweging in de demper t.g.v. de dynamische belasting minimaliseren door een stijve constructie.	
Realistische meetresultaten	Rolringdemper uitvoeren zoals dat in de praktijk ook gebeurt, waarbij de relevante onderdelen (die de proef beïnvloeden) zoveel mogelijk gelijkwaardig moeten zijn aan de praktijk	Nauwkeurige fabricage van de testopstelling
Metten met variërende massa	Zorgen dat de massa kan worden gevarieerd (Bijvoorbeeld 20, 30, 40, 50, 60, 70 en 80 kilogram)	Gelijkmatig aanbrengen gewicht
Genoeg waarnemingen	Video met voldoende frames per seconde, software waarmee de beelden frame voor frame kunnen worden bekeken	Software gebruiken waarbij losse beelden geanalyseerd kunnen worden
Metten met variërende wanddikte van de schaal	De schaal dusdanig monteren in de proefopstelling dat deze gemakkelijk uitwisselbaar is	Nauwkeurige fabricage van de testopstelling
Stabiele camerabeelden	Camera op statief positioneren	Juiste positionering camera
<u>Afstandssensor en logger</u>		
Voldoende nauwkeurigheid	Een model sensor te kiezen met een gunstige nauwkeurigheid	Veel sensoren zijn geproduceerd voor het onderwijs, en bieden onvoldoende nauwkeurigheid
Economische aanschafprijs	Een model sensor kiezen die gunstig is geprijsd (i.c.m. eventuele noodzakelijke randapparatuur)	Experimentele sensoren zijn erg duur
Beschikbaarheid	Een model sensor kiezen die binnen redelijke termijn geleverd kan worden	Veel sensoren worden in het buitenland gemaakt en zijn niet direct in Nederland beschikbaar

Tabel 5 Eisen/Wensen voor de proefopstelling

Deelsysteem

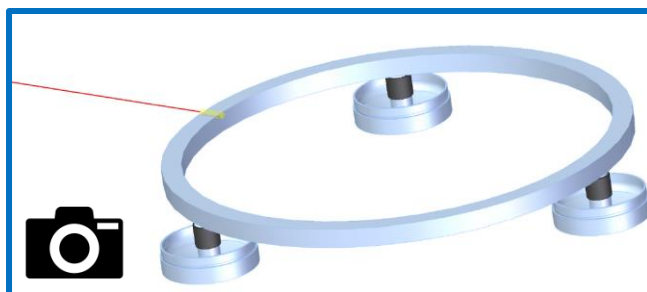
- 1.1 Meten aan de hand van beeldanalyse (met subsysteem maataanduiding)
- 1.2 Meten aan de hand van afstandssensor en datalogger
- 2.1 Variëren van het gewicht

De bovenstaande deelsystemen worden verder via het methodisch ontwerpproces uitgewerkt.

Tabel 6 Morfologisch overzicht

Functie	Werkwijze ⁵			
Werkwijze nummer	1	2	3	4
Beeldanalyse (opname maken van de trilling)	Burst-mode digitale camera ●	Video met digitale camera	Video maken met telefoon ●	Uitslag tekenen met potlood of kraspen ●
Aflezen meetresultaten	Maatverdeling langs beweging ●	Projectie met laser maken ●●		
Meten afstandssensor en datalogger	Distance sensor Einstein	Neulog motion logger sensor	Vernier motion detector	Go motion bewegingssensor
Variabele massa	Vierkante plaat	Ronde plaat ●●	Gebogen staf (demper gewicht) ●	

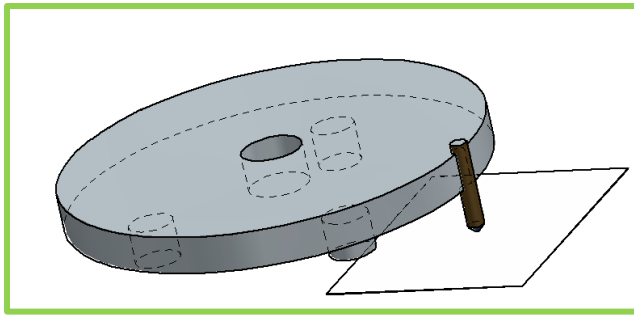
De verschillende werkwijzen kunnen voldoen in meer of mindere mate aan de in **Tabel 3 en Tabel 4** gestelde voorwaarden. De mate waarin ze aan deze voorwaarde voldoen is bepalend voor de geschiktheid van de onderdelen. Omdat niet alle voorwaarden even zwaar meewegen moet een weegfactor aan de voorwaarden worden toegekend. Deze weegfactor staat omschreven in de laatste kolom van **Tabel 6**. In de onderstaande tabel wordt de score van de verschillende alternatieven getoond. In de tabel hierboven zijn drie concepten beschikbaar, hieronder staan de schetsen van deze werkwijzen. De concepten worden aangeduid van een gekleurde stip, en worden aangeduid als **groen**, **oranje** en **blauw**. In de dit hoofdstuk zal worden gekeken hoe de verschillende concepten scoren, en welk concept het meest geschikt is om als proefopstelling te fungeren. Alle proefopstellingen gebruiken de kogelpotten en schaaltes zoals die in de praktijk ook worden gebruikt.



Concept Blauw maakt gebruik van een laser die langs een maatverdeling schijnt, met behulp van een digitale camera worden foto's gemaakt van de bewegende laserprojectie langs de maatverdeling. (De camera symboliseert de camera die gebruikt zal worden)

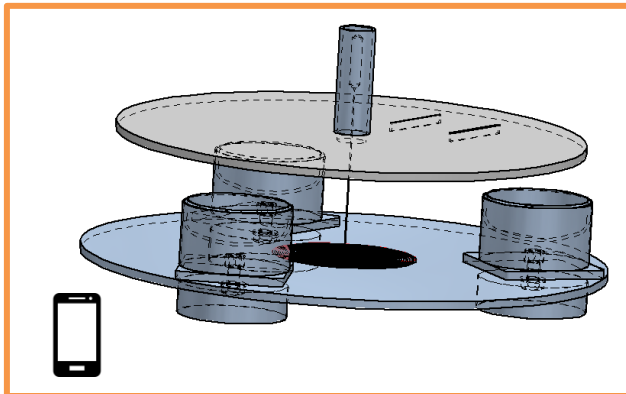
Figuur 12 Concept Blauw

⁵ Op pagina 38 staat de verantwoording voor het ontbreken van de verschillende afstandssensoren met dataloggers uit de concepten.



Concept Groen maakt gebruik van een potlood die op een papiertje de uitslag tekent. Deze uitslag kan vervolgens worden opgemeten.

Figuur 13 Concept Groen



Concept oranje maakt gebruik van een laserpen, die vertikaal naar beneden schijnt op een maatverdeling die in het centrum van de proefopstelling is aangebracht. De beweging van de laserstip wordt met een telefooncamera (in Figuur 14 worden de kogelpotjes niet afgebeeld, deze worden wel gebruikt)

Figuur 14 Concept Oranje

Deelfunctie: opnames maken van de trilling

Voor deze deelfunctie zijn vier alternatieven beschikbaar.

1. Het gebruik van de “burst-mode” van de digitale camera;
 - + Geen videobewerking programma nodig;
 - + De digitale camera kan makkelijk worden gepositioneerd met een statief;
 - + De digitale camera is direct beschikbaar;
 - 10 beelden per seconde leidt tot kwaliteitsverlies⁶;
2. Het gebruik van de videomode van de digitale camera;
 - + De digitale camera kan makkelijk worden gepositioneerd met een statief;
 - + 50 beelden per seconde geeft redelijke nauwkeurigheid;
 - + De digitale camera is direct beschikbaar;
 - De videobeelden moeten met speciale software worden geanalyseerd;
3. Het gebruik van de video functionaliteit van een telefoon;
 - + 120 beelden per seconde geeft een goede nauwkeurigheid;
 - + De telefoon kan worden afgesteund met een speciaal statief;
 - De videobeelden moeten met speciale software worden geanalyseerd.
4. Het gebruik van een potlood om de uitslag te tekenen;
 - + Zeer goed afleesbaar;
 - + Zeer goede nauwkeurigheid;
 - Als de demper volledig rechtlijnig beweegt, wordt de tweede uitslag lastig af te lezen;
 - Het “tekenen” geeft wrijving die de uitslag beïnvloed. (Valt hierdoor af)

Toelichting

Er kan gebruikgemaakt worden van een fotocamera. (Cyber-shot DSC-HX5V). Deze camera heeft een “burst foto mogelijkheid” hier fotografeert de camera tien foto’s per seconde. (7) Er wordt in deze stand elke 0,1 seconde een foto gemaakt. Deze foto’s kunnen zonder speciale software geanalyseerd worden.

De camera zou gedurende de slingering ongeveer zes foto’s maken. Door dit beperkte aantal beelden kan er een meetafwijking van 12% ontstaan (zoals berekend in **bijlage V**). Gezien de vereiste nauwkeurigheid van de proefopstelling is dit geen acceptabele waarde. (De gebruikte rekenmethode voor deze waarde staat in **bijlage V**). In dezelfde bijlage is berekend dat de videostand van de camera en de telefoon een nauwkeurigheid van respectievelijk 0,49% en 0,085%. Deze laatste twee opties zijn beiden geschikt.

Omdat het lastig is om nauwkeurige ijkpunten aan te brengen in de testopstelling (zonder de testopstelling zelf te beïnvloeden, is het handig om een projectie van de beweging te maken, en naast deze projectie kunnen nauwkeurige ijkpunten worden gemaakt. Op die manier hoeft bovendien enkel de projectie in beeld gebracht te worden. Het is dan wel belangrijk dat de projectie loodrecht op de slingerende beweging staat. De projectie kan bijvoorbeeld worden gemaakt door gebruik te maken van laserpen. De laser wordt op een vlak oppervlakte geprojecteerd, en door de beweging van het laserlicht te filmen, kan de slingering van de massa worden bepaald. Op deze manier kan worden voorkomen dat er aan de binnenzijde van de gladde schaaltes markeringen aangebracht moeten worden.

⁶ Het verlies van de nauwkeurigheid is in **bijlage V** berekend

Deelfunctie: aflezen meetresultaten met camera

Voor deze deelfunctie zijn twee alternatieven beschikbaar. Voor beide alternatieven zal de uitwijking moeten worden vastgelegd door middel van een opname. De uitwijking moet dan langs een meetlint of anderszins meetbare eenheid lopen.

1. Een projectie maken van de uitslag met behulp van een laserpen, en langs deze projectie een maatverdeling aanbrengen
 - + Nauwkeurig en goed afleesbaar;
2. Een maatverdeling aanbrengen op de plek van de slingering (in de schaaltes waar de kogelpot doorheen rolt).
 - + Nauwkeurig en goed afleesbaar;
 - De maatverdeling in de schaal kan invloed hebben op het rolgedrag van de kogelpot.

Deelfunctie: aflezen meetresultaten met sensor

Deze functie komt te vervallen doordat niet aan de gestelde eisen kan worden voldaan.

Deelfunctie: variabele massa

Voor deze deelfunctie zijn meerdere alternatieven beschikbaar.

1. Het gebruik van een rondgewalste staf;
 - + Staven kunnen binnen Bos Nieuwerkerk worden gewalst;
 - + Het gewicht dat voor de proefopstelling wordt gebruikt, kan later in gebruik worden genomen bij een rolringdemper;
 - Het centreren van de gewichten vereist ten minste twee pennen;
 - Walsen is bewerkelijk;
 - Het is lastig om een perfecte cirkel te walsen en om deze naadloos aan te laten sluiten;
2. Het gebruik van een plaat met gat;
 - + Productie van de benodigde ronde vorm is relatief gemakkelijk;
 - + Het centreren van de gewichten vereist slechts één pen
 - De platen worden door een toeleverancier gesneden, de prijs wordt hierdoor hoger;
 - Het gewicht dat voor de proefopstelling wordt gebruikt, kan later niet in gebruik worden genomen bij een rolringdemper.

Toelichting:

De wens om het gewicht van de proefopstelling gemakkelijk te kunnen variëren, kan op meerdere manieren worden bewerkstelligd. Het gewicht kan worden aangebracht door een bodemplaat te gebruiken, en daarop gewichten te stapelen.

Het gewicht kan zelf zo worden ontworpen dat deze gemakkelijk te monteren is. Aangezien in de ontwerpfase van de proefopstelling de diameter van de rolringdemper nog vrij kiesbaar is, kan er een handige diameter worden gekozen zodat het massa op een rond getal uitkomt. (De gewenste massa is 10 kg).

Werkwijze beeldanalyse	1 (Camera foto's)	2 (Camera video)	3 (Telefoon)	4 (Potlood)
Functionele voorwaarde	Score			
1. De proefopstelling moet binnen Bos Nieuwkerk gefabriceerd kunnen worden	10	8,5	7	10
2. De proefopstelling economisch uitvoeren	10	10	10	10
3. Nauwkeurige meetresultaten	5	8	9	5
Gewogen score	8	8,9	9	8

Werkwijze maatandauiding	1 (langs beweging)	2 (projectie laser)	-
Functionele voorwaarde	Score		
1. De proefopstelling moet binnen Bos Nieuwkerk gefabriceerd kunnen worden	10	8,5	-
2. De proefopstelling economisch uitvoeren	10	9	-
3. Nauwkeurige meetresultaten	6	8	-
Gewogen score	8,4	8,5	-

Werkwijze meten afstandsensor en datalogger (Vervallen)	1 (Einstein)	2 (Neulog)	3 (Vernier)	4 (Go Motion)
Functionele voorwaarde	Score			
1. De proefopstelling moet binnen Bos Nieuwkerk gefabriceerd kunnen worden	-	-	-	-
2. De proefopstelling economisch uitvoeren	?	8	6	8
3. Nauwkeurige meetresultaten	5	6	7	6
4. Snel beschikbaar	?	-	7	10
Gewogen score	X	X	X	X

Variable massa	1 (Vierkant)	2 (Rond)	3 (Gebogen staf)
Functionele voorwaarde	Score		
1. De proefopstelling moet binnen Bos Nieuwkerk gefabriceerd kunnen worden	10	7	8
2. De proefopstelling economisch uitvoeren	8	7	8
3. Nauwkeurige meetresultaten	7	10	8
Gewogen score	8	8,2	8

Tabel 7 Gewogen scores

Aan de hand van de bovenstaande scores kan bepaald welke werkwijze de voorkeur geniet. Bij het gebruik van een bewegingssensor zijn niet alle scores volledig ingevuld, doordat niet alle fabrikanten hebben gereageerd op een prijsaanvraag. Bovendien zijn niet alle opties binnen de benodigde tijd leverbaar, deze vallen daarom direct af. Een tweede kanttekening bij het gebruik van deze bewegingssensoren is de beperkte nauwkeurigheid. Het idee achter een tweede meetmethode is om de eerste meting te verifiëren. Dit doel wordt echter niet behaald als de meetmethode onvoldoende nauwkeurigheid biedt. Geen van de beschikbare afstandsloggers voldoet aan de gestelde voorwaarden, en deze worden dan ook niet in de proefopstelling gebruikt.

Van de verschillende concepten (groen, oranje en blauw) kan aan de hand van de gegevens uit het vorige hoofdstuk worden vastgesteld welke het beste voldoet aan de gestelde eisen. Dat concept kan tot een testopstelling worden uitgewerkt. Uit **Tabel 7** volgen de scores per concept:

- Groen scoort: 24,6
- Oranje scoort: 25,7
- Blauw scoort: 24,5

Aangezien Oranje het beste scoort zal dit concept worden gebruikt in de proefopstelling:

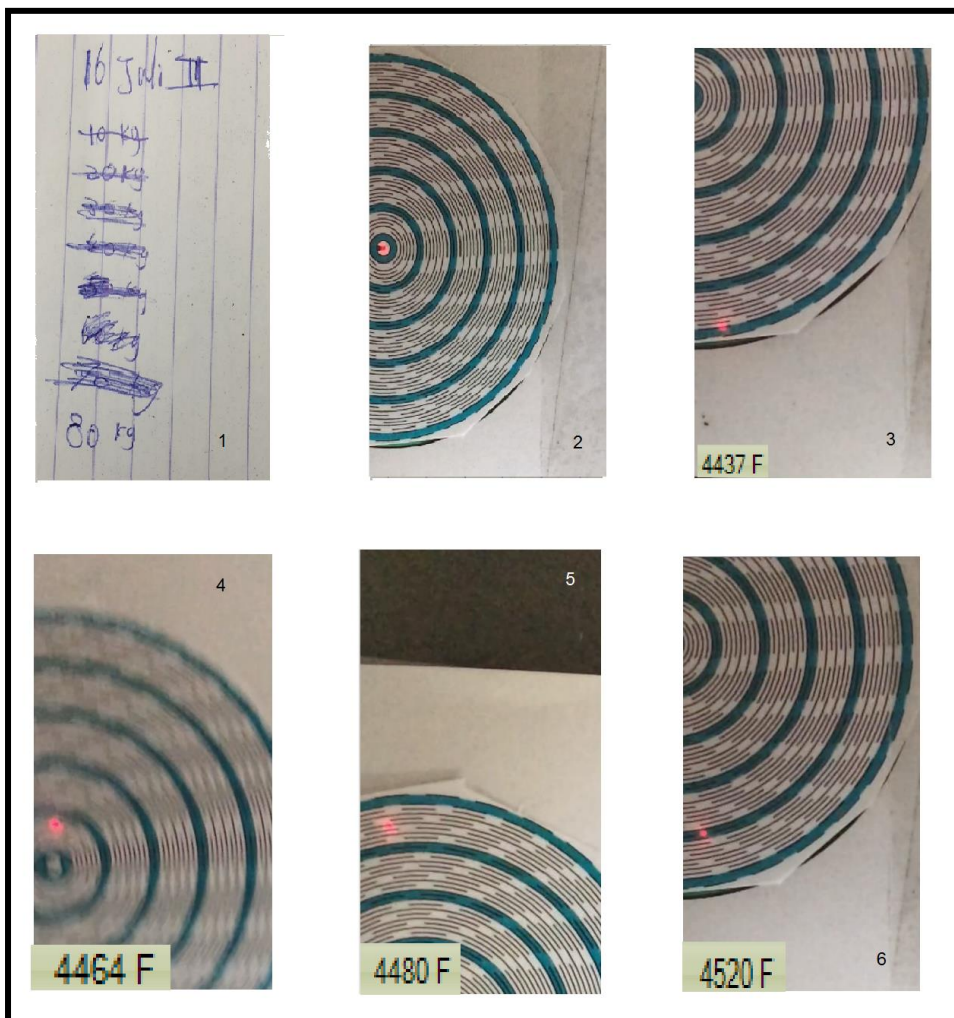
De testopstelling wordt uitgevoerd met een met ronde plaatgewichten die gecentreerd zijn rondom een holle pen. Deze pen biedt bovendien ruimte voor een laser die een verticale projectie maakt die naar beneden is gericht. Hierdoor wordt er een rode stip (die de beweging van de rolringdemper volgt) op de bodemplaat geprojecteerd. De ronde platen en de bodemplaat zijn met een laser gesneden, hierbij is op de bodemplaat een maatverdeling gegraveerd. Aan de onderzijde van het onderste gewicht zijn de kogelpotten bevestigd. Bovendien is deze plaat voorzien van speciale sleuven. Deze kunnen worden gebruikt om een telefoon op te hangen zodat hiermee de uitwijking kan worden gefilmd. Dit gebeurt met een telefoon. Aan de bodemplaat zijn de kragen gemonteerd, de kragen zijn non-destructief te verwijderen, zodat de metingen met verschillende schaaldiktes kan worden uitgevoerd. De bouwtekening van het model is als **bijlage VI** toegevoegd.



Figuur 15 uiteindelijk ontwerp

Met de proefopstelling zijn metingen gedaan. Deze metingen zijn aan de hand van de video-opnames geanalyseerd. Deze analyse is in **Figuur 11** zichtbaar gemaakt.

1. In het eerste frame wordt het nummer van de meting, de datum en de massa opgeschreven. In dit geval; de tweede meting van 16 juli met een massa van 80 kg;
2. In het tweede frame, wordt de camera goed gepositioneerd en gecontroleerd dat de laserpunt goed in het midden van de schijf staat;
3. Vervolgens wordt de proefopstelling met de hand uit positiegebracht. Vanaf dit moment is ook het framenummer van de video interessant. Hiermee kan namelijk tijdstip het tijdstip worden bepaald;
4. Na het loslaten (Frame 4) slingert de massa door het evenwichtspunt;
5. In de uiterste stand zal de massa heel even stilstaan (frame 5);
6. Waarna de massa weer terugrolt naar de beginzijde. (Frame 6). In de uiterste stand kan de positie worden uitgelezen.



Figuur 16 Analyse van de videobeelden

De meetresultaten zijn in Excel verwerkt en geanalyseerd. Een overzicht van de meetresultaten van het bovenstaande voorbeeld staat in

Tabel 8. De overige meetresultaten zijn als **Bijlage VII** bijgevoegd. Aan de hand van de meetresultaten moet de demping worden bepaald.

Waarneming [n]	Stand [mm]	Tijdstip [s]	Aantal trillingen	Frame- nummer
1	25	0	0	4437
2	-23	0,358333		4480
3	20,3	0,691667	1	4520
4	-19,6	1,016667		4559
5	17,3	1,333333	2	4597
6	-16,5	1,641667		4634
7	14,3	1,958333	3	4672
8	-14,2	2,275		4710
9	11,6	2,591667	4	4748
10	-11,5	2,875		4782
11	9,5	3,183333	5	4819
12	-9	3,483333		4855
13	7,5	3,783333	6	4891
14	-6,6	4,091667		4928
15	5,2	4,375	7	4962
16	-4,3	4,666667		4997
17	3,2	4,966667	8	5033
18	-2,3	5,266667		5069
19	1,3	5,583333	9	5107
20	-0,5	5,916667		5147
21	0	6,358333	10	5200

Tabel 8 Meetresultaten m = 80 kg r = 101,6mm , 16 juli, tweede reeks

5.1.1 Verwerking van meetgegevens van één meting

Om de bovenstaande gegevens beter uit te kunnen lezen, worden deze weergegeven in een grafiek. Van de grafiek kan het verloop van de amplitudegrootte worden weergegeven. Deze lijn wordt in de grafieken op de volgende pagina benoemd als de “waargenomen trendlijn”. Daarnaast kan de op basis van **vergelijking [2.23]** berekende logaritmische afname van de amplitudegrootte worden geplot. Deze “voorspelde trendlijn” kan worden gebruikt om te bepalen of deze amplitude afname (die wordt berekend aan de hand van een ideaal logaritmisch verloop) overeenkomt met de daadwerkelijk gemeten trendlijn.

Deze berekening op basis van één enkele meting is gevoelig voor meetfouten, daarom is er dezelfde lijn ook geplot aan de hand van:

- Het amplitudeverschil van de eerste volledige trilling;
- Het amplitude verschil van de tweede volledige trilling;

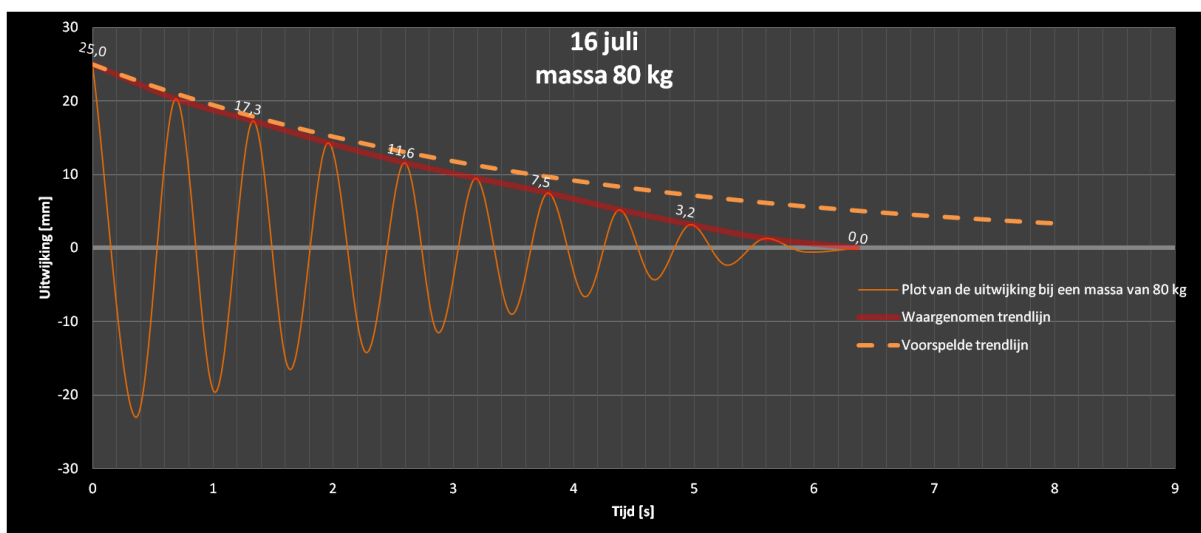
- Het gemiddelde amplitudeverschil van de eerste twee trillingen;
- Het gemiddelde amplitudeverschil van de eerste drie trillingen;
- Het gemiddelde amplitudeverschil van de eerste vier trillingen;
- Het gemiddelde amplitudeverschil van de eerste vijf trillingen.

De meetresultaten van

Tabel 8 staan in **Figuur 17**, **Figuur 18** en **Figuur 19** weergegeven, waarbij steeds een andere voorspelde trendlijn staat geplot. Het voorspelde decrement blijkt niet geheel overeen te komen met de daadwerkelijk waargenomen trendlijn. (Dit is onder andere te wijten aan het feit dat een logaritmische functie nooit volledig gelijk zal zijn aan nul, waar de demper in de praktijk na enige tijd volledig zal zijn uitgedempt.)



Figuur 17 Voorspelde trendlijn op basis van eerste meting



Figuur 18 Voorspelde trendlijn op basis van tweede meting



Figuur 19 Voorspelde trendlijn op basis van het gemiddelde van de eerste vijf metingen

Het blijkt dat er voor elke meting een discrepantie is tussen de 'waargenomen trendlijn' en de 'voorspelde trendlijn'. De eerste helft van de uitdamping (de eerste vier seconden) komt wel redelijk overeen met de 'voorspelde trendlijn' met name als de dempingcoëfficiënt is gebaseerd op het gemiddelde van de eerste vijf trillingen. Op basis van dat gemiddelde kan de demping worden bepaald.

De rekenkundig gemiddelde dempingcoëfficiënt δ op basis van de eerste vijf trillingen wordt berekend door **vergelijking [2.22]** te herschrijven tot:

$$\delta = \frac{\ln\left(\frac{A_0}{A_5}\right)}{T_5} \quad [5.1]$$

Hierin is A_0 de begin amplitude [mm], A_5 de amplitude na de vijfde volledige trilling [mm] en T_5 de tijd na de vijfde volledige trilling [sec].

Op een soortgelijke wijze kan het rekenkundig gemiddelde van de dempverhouding D worden bepaald door **vergelijking [2.18]** te herschrijven tot:

$$D = \frac{1}{2\pi N_t} \ln\left(\frac{A_0}{A_5}\right) \quad [5.2]$$

Hierin is N_t het aantal trillingen (in dit geval 5).

Ook het gemiddelde logaritisch decrement kan worden verkregen door **vergelijking [2.19]** te herschrijven tot:

$$\lambda = \frac{-\ln\frac{A_1}{A_0} - \ln\frac{A_2}{A_1} - \ln\frac{A_3}{A_2} - \ln\frac{A_4}{A_3} - \ln\frac{A_5}{A_4}}{N_t} = \frac{-\ln\frac{A_5}{A_0}}{N_t} \quad [5.3]$$

Voor de meting van 16 juli ($m=80$ kg $r = 101,6$ mm) worden deze gemiddelde waarden:

$\delta = 0,3039531$
[volgt uit 5.1]

$D = 0,03799$ ofwel $D = 3,0799 \%$
[volgt uit 5.2]

$\lambda = 0,19355$
[volgt uit 5.3]

Aan de hand van de waarde van D en de waarde van λ kan de damping C worden berekend. Dit gebeurt aan de hand van **vergelijking [2.18]**, **vergelijking [2.19]** en **vergelijking [2.21]**. Deze vergelijkingen kunnen worden herschreven tot :

$$c = \frac{\lambda}{2\pi} c_{cr} \quad [5.4]$$

De literatuur (van Kooten) schrijft deze formule ook wel als:

$$c = D c_{cr} \quad [5.5]$$

Als het voorbeeld van de meting 2 van 16 juli ($m=80$ kg $r=101,6$ mm) verder wordt uitgewerkt moet eerst nog de kritische damping worden berekend, deze kan worden bepaald met **vergelijking [2.20]** daarin is veerconstante k, de hoeksnelheid ω_o en de massa nog nodig. Aan de hand van **vergelijking [3.11]** kan k worden benaderd.

In SI-eenheden:

$$k = K_t = \frac{80 \times 9,81}{0,1016} = 7724 \text{ [N/m]}$$

De berekende waarde van ω_o volgt uit de gemiddelde trillingstijd:

$$\omega_o = \frac{2\pi}{(T_5/5)} = \frac{2\pi}{(3,183333/5)} = 9,8689 \text{ [rad/s]}$$

De kritische damping volgt uit **vergelijking [2.20]**:

$$c_{cr} = 2\sqrt{km} \approx \frac{2k}{\omega_o} \rightarrow 2\sqrt{7724 \times 80} = 1572 \left[\frac{Ns}{m} \right] \approx \frac{2 \times 7724}{9,8689} \approx 1565 \left[\frac{Ns}{m} \right]$$

Uit de kritische damping wordt vervolgens de damping berekend volgens **vergelijking [5.4]** of **[5.5]**

$$c = \frac{0,19355}{2\pi} 1572 = 48,4 \left[\frac{Ns}{m} \right]$$

Deze damping is berekend op basis van meting 2 van 16 juli ($m=80$ kg $r=101,6$ mm) Zoals aangegeven in

Tabel 8. Door de berekening te baseren op een enkele meting, is er kans op fouten ten gevolge van afleesfouten. Bij een groter aantal metingen wordt dit risico niet volledig uitgesloten, maar een hoger aantal metingen verkleint de foutmarge. In de volgende paragraaf wordt de bovenstaande methode op meerdere metingen toegepast.

In **hoofdstuk 3** staat een alternatieve rekenwijze om de dampingconstante te berekenen. Deze berekening is gebaseerd op **vergelijking [3.15]**. Bij deze rekenmethode word eerst gekeken naar het verschil in potentiële energie in het systeem. Van dit verschil wordt aangenomen dat alle energie is omgezet in warmte. Vervolgens wordt gekeken wat de afgelegde afstand is, hiermee kan namelijk worden bepaald wat de gemiddelde wrijvingskracht moet zijn geweest. Tot slot kan de wrijvingskracht worden uitgedrukt als functie van de snelheid. Deze snelheid wordt bepaald aan de hand van de opgemeten amplitudes. De snelheid [mm/s] van de beweging is als volgt gedefinieerd:

$$v_{gem} = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n}{T_n} \quad [5.6]$$

Hierin zijn de amplitudes [mm] benoemd zoals in **Figuur 20** en T_n is de verstreken tijd na 'n' volledige trilling [s].

Als het voorbeeld wordt de meting van 16 juli ($m=80$ kg $r=101,6$ mm) uitgewerk (waardes volgen uit **Bijlage VII**):

$$\Delta h_n = \left(101,6 \left\{ \cos \left(\sin^{-1} \frac{9,5}{101,6} \right) - \cos \left(\sin^{-1} \frac{25}{101,6} \right) \right\} \right) = 2,68 \text{ [mm]}$$

Dit geeft een energieverval van:

$$\Delta E_p = 80 \times 9,81 \times 0,00268 = 2,10 \text{ [J]}$$

Hieruit kan de wrijving worden afgeleid:

$$F_w = \frac{2,10}{0,331} = 6,35 \text{ [N]}$$

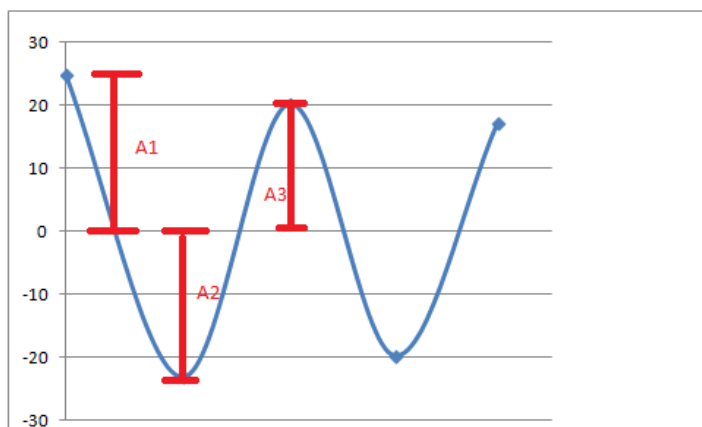
Vervolgens kan met **vergelijking [5.6]** de gemiddelde snelheid worden berekend:

$$v_{gem} = \frac{(25 + 23 + 23 + 20,3 + \dots + 9,5)10^{-3}}{3,18} = 0,104 \text{ [m/s]}$$

Als de demping wordt uitgedrukt als functie van de snelheid volgt de dempfactor [Ns/m]

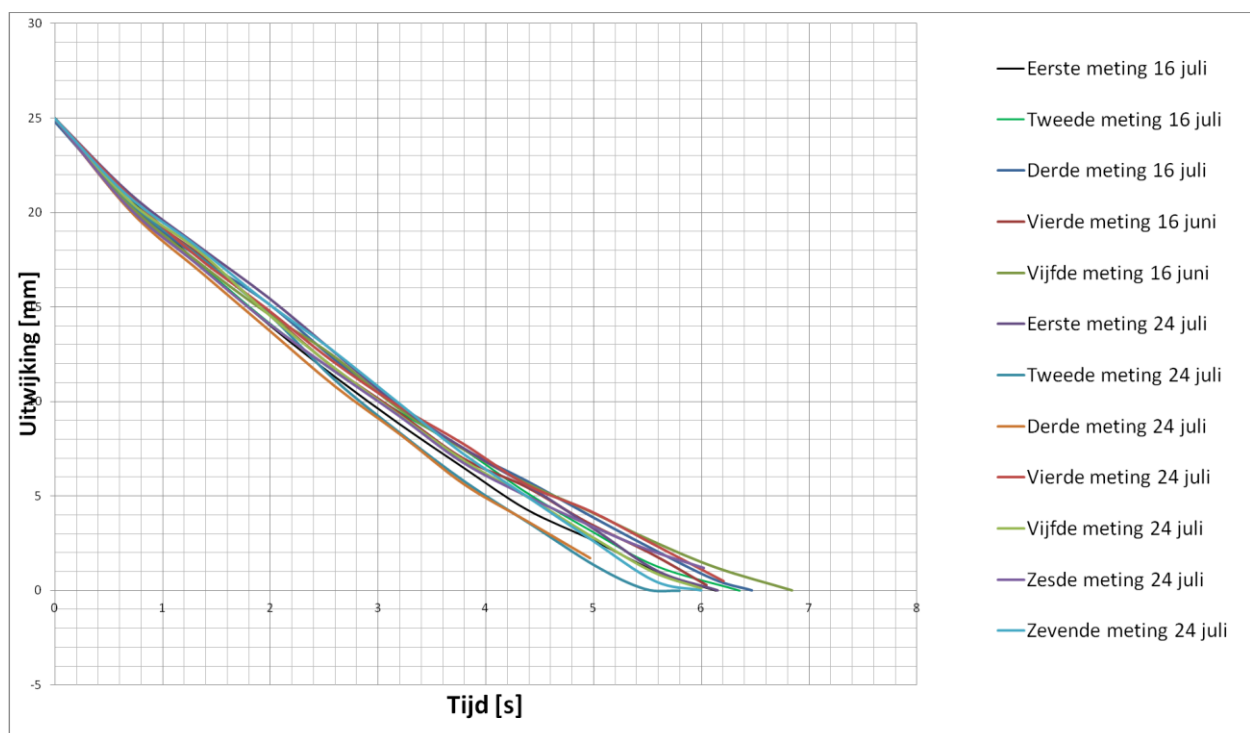
$$c = \frac{6,35}{0,104} = 61,0 \text{ [Ns/m]}$$

Hierin wordt uitgegaan van een volledig rechtlijnige beweging van de massa. In werkelijkheid is de baan van het object wat langer. Hierdoor valt de werkelijke snelheid hoger uit, waardoor de dempfactor in realiteit iets lager zal uitvallen.

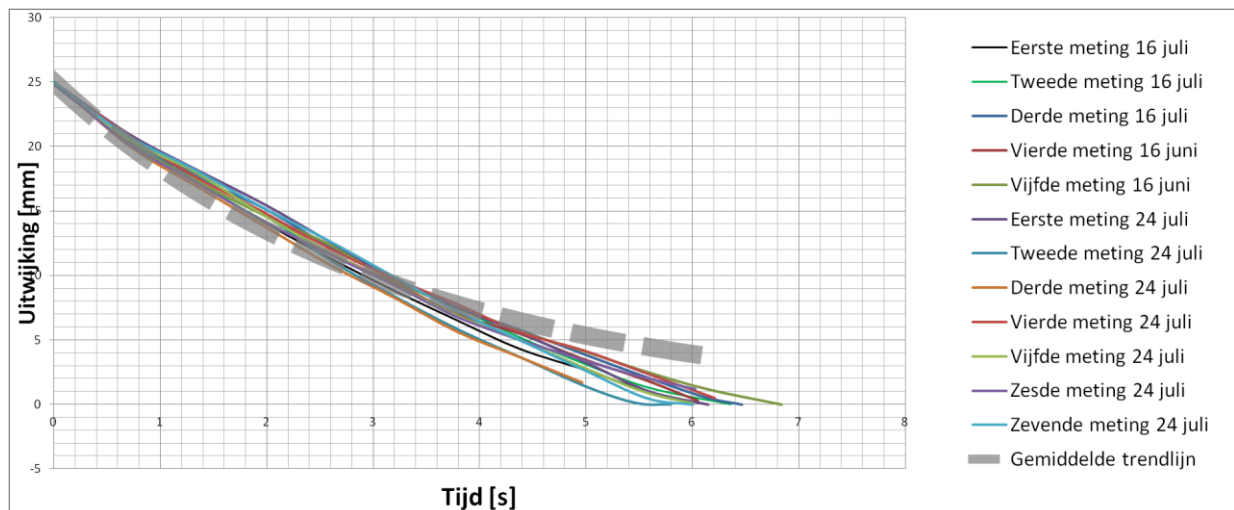


Figuur 20 Benaming amplitudes ten behoeve van de snelheidsbepaling

Bij een gelijkblijvende massa is eenzelfde demping te verwachten. In de praktijk blijkt echter dat de uitslag in de tijd, per meting afwijkt. Dit wordt in **Figuur 21** duidelijk. Hierin zijn verschillende “waargenomen trendlijnen” geplot, zoals die bij metingen van een massa van 80 kg en straal van 101,6 mm zijn bepaald. De figuur dient ter illustratie van het feit dat het verloop van de uitslagen per meting verschilt. Deze discrepantie komt mogelijk voort uit een meetafwijking of afleesfout. Door de dempingcoëfficiënt $[\delta]$, dempverhouding $[D]$ en het logaritmisches decrement $[\lambda]$ te bepalen aan de hand van meerdere metingen, en deze metingen te verwerken volgens de methode die is omschreven zoals in **hoofdstuk 5.1.1** kan het gevolg van deze discrepanties voor de berekende demping worden vermindert. Door per meting de gemiddelde dempingcoëfficiënt over de eerste vijf trillingen te bepalen, en van al deze coëfficiënten weer een gemiddelde te bepalen, wordt de werkelijkheid redelijk benaderd. In **Figuur 22** (op de volgende pagina) staat een trendlijn, die is verkregen middels deze methode.



Figuur 21 Waargenomen trendlijnen bij 80 kg $r=101,6\text{mm}$



Figuur 22 Gemiddelde trendlijn bij 80 kg r=101,6 mm

Het principe van de gemiddelden van de dempingcoëfficiënt $[\delta]$, dempverhouding $[D]$ en het logaritisch decrement $[\lambda]$ van een verzameling aan metingen is hieronder uitgewerkt. In **Bijlage VII** staan de berekeningen uitgewerkt.

Allereerst wordt de gemiddelde waarde van de dempingcoëfficiënt bepaald. Dit gebeurt aan de hand van het rekenkundig gemiddelde van **vergelijking [5.1]**:

$$\delta_{gem} = \frac{\frac{\ln\left(\frac{A_0}{A_5}\right)}{T_5} [\text{eerste meting}] + \frac{\ln\left(\frac{A_0}{A_5}\right)}{T_5} [\text{tweede meting}] + \dots + \frac{\ln\left(\frac{A_0}{A_5}\right)}{T_5} [\text{laatste meting}]}{N_m} \quad [5.7]$$

Hierin is N_m het totale aantal metingen waarvan het gemiddelde is bepaald.

Rekenkundig gemiddelde van de dempverhouding volgens **vergelijking [3.14]**:

$$D_{gem} = \frac{\frac{1}{2\pi N_t} \ln\left(\frac{A_0}{A_5}\right) [\text{eerste meting}] + \frac{1}{2\pi N_t} \ln\left(\frac{A_0}{A_5}\right) [\text{tweede meting}] + \dots + \frac{1}{2\pi N_t} \ln\left(\frac{A_0}{A_5}\right) [\text{laatste meting}]}{N_m} \quad [5.8]$$

Volgens dezelfde wijze wordt het rekenkundig gemiddelde van het logaritisch decrement bepaald:

$$\lambda_{gem} = \frac{\frac{-\ln\frac{A_1}{A_5}}{N_t} [\text{eerste meting}] + \frac{-\ln\frac{A_1}{A_5}}{N_t} [\text{tweede meting}] + \dots + \frac{-\ln\frac{A_1}{A_5}}{N_t} [\text{laatste meting}]}{N_m} \quad [5.9]$$

In het gegeven voorbeeld van 80 kg r=101,6mm, zijn deze gemiddelde waarden:

$$\delta_{gem} = 0,3098$$

$$D_{gem} = 3,154\%$$

$$\lambda_{gem} = 0,1982$$

Deze waarden zijn eveneens terug te vinden in **Bijlage VII {metingen 101 80}**

Om de dempingsconstante te bepalen, wordt **vergelijking [5.4]** toegepast. Hierin wordt het logaritmisch decrement, dat op de voorgaande pagina is bepaald, gebruikt. Bovendien wordt de kritische demping gebruikt. De kritische demping verandert niet bij gelijkblijvende massa en pendellengte. De kritische demping is reeds bepaald aan de hand van **vergelijking [2.20]** de gevonden waarde in **Hoofdstuk 5.1.1** is 1572 [Ns/m]:

$$c_{gem} = \frac{0,198186}{2\pi} 1572 = 49,6 [Ns/m]$$

De dempingsconstante kan ook worden berekend aan de hand van het rekenkundig gemiddelde van de uitkomsten van **vergelijking [3.16]** de uitwerking van deze methode staat in **bijlage IV**:

$$c_{gem} = \frac{c_1 + c_2 + \dots + c_n}{n} = 62,5 [Ns/m]$$

Hierin is n het aantal metingen waarvan het gemiddelde bepaald is.

5.2 De onderzoeksresultaten vergeleken met Chimney™

De methode die in de voorgaande paragrafen is uitgelegd is voor alle metingen toegepast. Met de resultaten kan een overzicht worden gemaakt van de dempverhouding die is waargenomen met de proefopstelling. Deze waarde kan dan gemakkelijk vergeleken worden met Chimney™.

Tabel 9 Damping op basis van de metingen

Massa	D bepaald met Chimney	D bepaald met proef 101,6	D bepaald met proef 152
10	18%	3,57%	4,91%
20	16%	2,46%	2,81%
30	14%	2,02%	1,98%
40	12%	1,85%	1,60%
50	10%	1,99%	2,08%
60	8%	2,07%	2,19%
70	6%	2,27%	2,58%
80	4%	3,15%	2,35%

Tabel 10 Damping op basis van de metingen

Massa	kritische damping 101,2 [Ns/m]	berekende damping 101,2 [Ns/m]	berekende damping met Chimney [Ns/m]
10	197	7,0	35
20	393	9,8	63
30	590	12	83
40	786	15	94
50	983	19	98
60	1179	24	94
70	1376	31	83
80	1572	39	63

Tabel 11 Damping op basis van metingen

Massa	kritische damping 152 [Ns/m]	berekende damping 152 [Ns/m]	Berekende damping met Chimney [Ns/m]
10	161	7,0	29
20	321	6,6	51
30	482	8,9	67
40	643	9,8	77
50	803	15	80
60	964	19	77
70	1125	26	67
80	1285	28	51

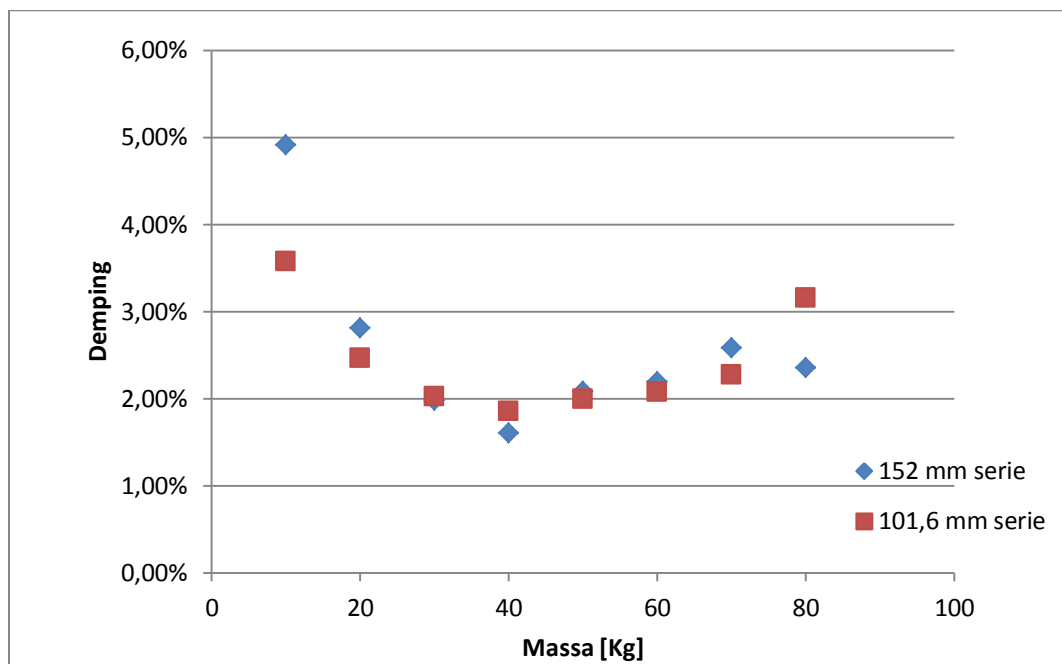
Tabel 12 Decrement uit de metingen

Massa	λ bepaald met Chimney	λ bepaald met proef 101	λ bepaald met proef 152
10	1,13	0,225	0,3083
20	1,01	0,155	0,1372
30	0,88	0,1267	0,1242
40	0,75	0,116	0,1004
50	0,63	0,125	0,1313
60	0,50	0,130	0,1373
70	0,38	0,144	0,1619
80	0,25	0,155	0,1477

Uit de bovenstaande gegevens kan meteen worden gezien dat de waardes uit de proefopstelling niet overeenkomen met de berekeningen uit Chimney™.

Met name **Tabel 9** is interessant omdat de berekening van de demping in Chimney volgens een bekende formule gebeurt. (**Vergelijking [2.36]**)

De demping uitgedrukt in procenten, die uit **Tabel 9** naar voren komt, kan is in de onderstaande figuur geplot.



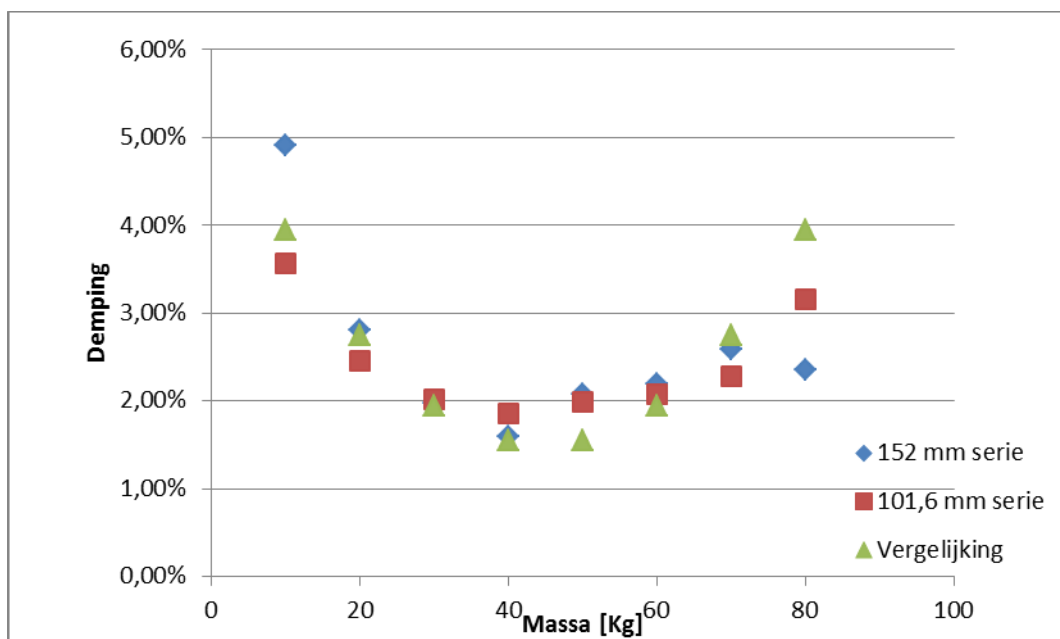
Figuur 23 plot van de gegevens uit Tabel 9

Het is opvallend dat de demping in eerste instantie lijkt af te nemen en vanaf een massa van 40 kg weer lijkt toe te nemen. Een verklaring hiervoor kan worden gevonden in **Tabel 10** en **Tabel 11**. Hierin is namelijk te zien dat de dempingsconstante bij deze waarde een maximum bereikt. Bij verder

toenemende massa neemt deze dempingsconstante juist weer af. (Hoewel de kritische demping verder blijft stijgen.)

Het verloop van deze dempfactor (en dus de demping) is opvallend. Een verklaring voor dit fenomeen is het “ontstaan” van de demping, die zoals in hoofdstuk 3.1 is uitgelegd, ontstaat ten gevolge van de rolwrijving. De rolwrijving is afhankelijk van de massa. De beweging komt voort uit de “vervangende veerconstante” die eveneens afhankelijk is van de massa. Het is goed voor te stellen, dat er bij een kleinere massa een kleinere F_a optreedt, maar dat er relatief veel wrijving optreedt. Doordat de materiaalvervorming (en de hysteresie die daaruit ontstaat) relatief groot is.

Om de demping [in %] te berekenen is een alternatieve vergelijking mogelijk. Op basis van de meetresultaten kan op de interval [10 tot 80 kg] de demping worden berekend met:



Figuur 24 Alternatieve berekening

De vergelijking is gelijk aan:

$$\frac{(M-45)^2}{500} + 1,5 \quad [5.10]$$

De resultaten van de berekeningen staan in de onderstaande tabel

Massa	D bepaald met proef 101,6	D bepaald met proef 152	Alternatieve berekening
10	3,57%	4,91%	3,95%
20	2,46%	2,81%	2,75%
30	2,02%	1,98%	1,95%
40	1,85%	1,60%	1,55%
50	1,99%	2,08%	1,55%
60	2,07%	2,19%	1,95%
70	2,27%	2,58%	2,75%
80	3,15%	2,35%	3,95%

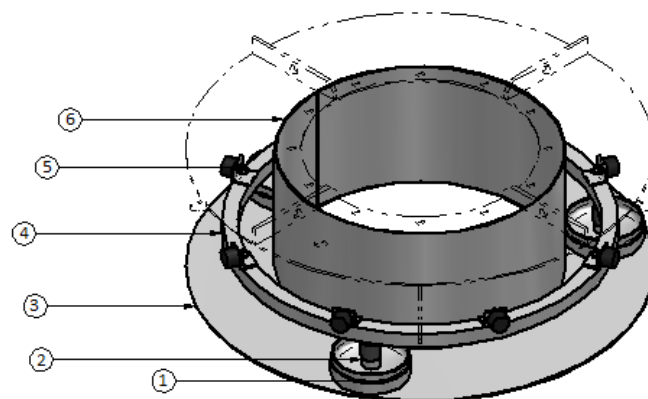
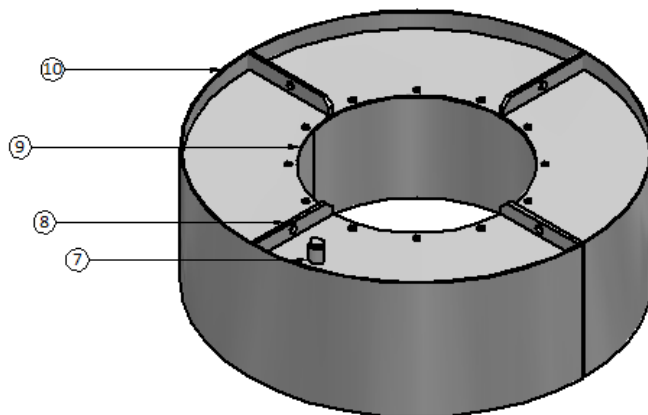
Dit rapport omschrijft de werkwijze en resultaten van de controle die op het rekenprogramma Chimney is uitgevoerd. Op basis van de waargenomen meetresultaten kan worden geconcludeerd dat de berekeningen van Chimney niet overeenkomen met de waargenomen meetresultaten. In het rapport is bovendien een alternatieve berekening voorgesteld die in ieder geval voor de interval 10 – 80 kg gebruikt kan worden.

1. **Bos Nieuwerkerk BV.** *Inspectierapport.* Nieuwerkerk aan de IJssel : -, 2009.
2. **Kooten, H. van.** *Structural Damping.* Delft : Heron, 1997.
3. **Vandepitte, Daniël.** *Berekening van Constructies - Bouwkunde en Civiele Techniek Boekdeel I.* Gent : sn, 2003.
4. **Stewart, James.** *Calculus Early Transcendentals Sixth Edition.* Belmont : Brooks/Cole Cengage Learning, 2008.
5. **Eurocode.** *NEN-EN 1991-1-4:2005 Eurocode 1: Belastingen op constructies - Windbelasting.* Delft : TGB Basiseisen en belastingen, 2005. ICS-code 91.010.30.
6. **Rekenset.nl.** Natuurkunde: Trillingen en Golven. *Rekenset.nl.* [Online]
http://www.rekenset.nl/Natuurkunde/Natuurkunde_index.htm.
7. **Sony Corporation.** Cyber-shot-handboek. *Ondersteuning voor DSC-HX5V.* [Online] 2010.
<http://pdf.crse.com/manuals/4172668721.pdf>.
8. **Culpepper, Martin.** *Mass spring damper system.* MIT, massachusetts : sn.
<http://ocw.mit.edu/courses/mechanical-engineering/2-003-modeling-dynamics-and-control-i-spring-2005/labs/lab3fig3.gif>.
9. **Aerospace, Mechanical & Mechatronic University of Sydney.** Drag Coefficient. *Aerodynamics for students.* [Online] 2005. http://www-mdp.eng.cam.ac.uk/web/library/enginfo/aerothermal_dvd_only/aero/fprops/introvisc/node11.html.

Bijlage I	omschrijving van de onderdelen van de rolringdemper
Bijlage II	toelichting op het ontstaan van wrijving
Bijlage III	toelichting op het begrip hysteresis
Bijlage IV	toelichting vervangende veerconstante
Bijlage V	verlies aan nauwkeurigheid afhankelijk van gebruikte videoapparatuur
Bijlage VI	bouwtekening proefopstelling
Bijlage VII	meetresultaten
Bijlage VIII	Plan van aanpak en competentieomschrijving

Bijlage 2

Onderdelen rolringdemper



10	1	Buitenmantel demper
9	1	Bovenplaat
8	4	Hijsoog
7	1	Lassok
6	1	Binnenmantel
5	8	Stootrubber
4	1	Gewicht
3	1	Onderplaat
2	3	Kogelpot
1	3	Schaal
Posnr	Aantal	Benaming

Wrijving ten gevolge van schuiven

Wrijving kan worden omschreven als de weerstand tegen de beweging tussen twee lichamen die ten opzichte van elkaar bewegen (glijden of schuiven). Deze weerstand uit zich in een kracht in de richting tegen de beweging in. In de literatuur wordt onderscheid gemaakt tussen zogenaamde droge wrijving en viskeuze (of natte) wrijving. (Bhushan, 2013) Hier zal alleen worden ingegaan de droge wrijving.

In het verleden is door wetenschappers Guillaume Amontons en Charles-Augustin Coulomb (empirisch) een aantal wetten vastgesteld waaraan de wrijving voldoet (University of Washington Nanolab):

1. The force of friction is directly proportional to the applied load (Amontons 1st law);
2. The force of friction is independant of the apparent area of contact (Amontons 2nd law);
3. Kinetic friction is independent of sliding velocity (Coulomb's law).

De eerste wet kan wiskundig worden omschreven met de onderstaande vergelijking:

$$F_w = \mu W \quad [\text{II-1}]$$

Hierin is

F_w = wrijvingskracht [in Newton]

μ = wrijvingscoëfficiënt

W = gewicht [in Newton]

Om de tweede wet te verklaren moet eerst worden vastgesteld wat er precies gebeurt bij het ontstaan van wrijving¹. Hiertoe moet eerst het oppervlakte van de glijdende lichamen worden geanalyseerd. Op microscopische schaal zijn er op een dergelijke gladde oppervlakten zogenaamde asperity's zichtbaar. Dit zijn oneffenheden in het materiaal die praktisch niet verwijderd kunnen worden. Twee oppervlaktes die op elkaar rusten zullen in werkelijkheid alleen contact hebben op de toppen van deze oneffenheden. Op deze contactpunten wordt het materiaal vervormd. De som van de oppervlaktes op deze contactpunten wordt omschreven als A_r [in m²]. Dit werkelijke contactoppervlak tussen twee lichamen is veelal een stuk lager dan schijnbaar het geval. A_a [in m²]. (Figuur II-1)



Figuur II-1 Vervorming van asperity door toevoegen van druk (TotoBaggins)

Twee metalen die langs elkaar glijden kunnen leiden tot hoge druk op de contactpunten. Deze druk hebben sterke adhesieve banden tot gevolg. De wrijving ontstaat doordat deze banden worden verscheurd (bij deze verscheuring kunnen er fragmenten van het oorspronkelijke materiaal worden meegetrokken). Ook de vervorming van de contactoppervlaktes kost energie. Als er wordt aangenomen dat deze vormen van dissipatie geen onderlinge invloed op elkaar uitoefenen, kan de wrijving tussen twee oppervlakten worden omschreven als:

$$F_w = F_i = F_a + F_d \quad [\text{II-2}]$$

¹ Het omschreven mechanisme is een theorie voor de wrijving tussen metalen die veelal wordt geaccepteerd maar niet is bewezen (Gao, Luedtke, Gourdon, Ruths, Israelachvili, & Landman, 2003)

Hierin is:

F_i = de intrinsieke wrijvingskracht

F_a = de benodigde kracht om de adhesieve banden te verscheuren

F_d = de benodigde kracht om de oppervlaktetestes te deformeren.

De wrijvingsfactoren verhouden zich op eenzelfde wijze:

$$\mu_t = \mu_a + \mu_d$$

[II-3]

Hierin is:

μ_i = de intrinsieke wrijvingsfactor

μ_a = de wrijvingsfactor ten gevolge van de adhesieve banden

μ_d = de wrijvingsfactor ten gevolge van de oppervlakte deformatie

De eerste term van vergelijking II-2 kan worden omschreven als:

$$F_a = A_r \tau_a$$

[II-4]

Hierin is: τ_a = de gemiddelde maximale schuifspanning

Hieruit blijkt dat de wrijvingsfactor gelijk is aan:

$$\mu_a = \frac{A_r \tau_a}{W}$$

[II-5]

Rolwrijving

Rolwrijving wordt door (Bhushan, 2013) omschreven als; de weerstand tegen beweging die optreedt wanneer een oppervlakte over een ander oppervlakte rolt. (Bowden & David, 1974) Beschrijven dat er in het verleden werd aangenomen dat de wrijving bij een rollende beweging optrad ten gevolge van het zogenaamde slip. Tijdens het slippen vindt er wrijving plaats zoals bij het schuiven. Uit latere experimenten blijkt echter dat deze aanname niet geheel waar is. Immers het gebruik van glijmiddel zorgt nauwelijks voor een afname van de rolwrijving. (Als de rolwrijving enkel uit slip had bestaan, zou het glijmiddel een beduidend grotere invloed moeten hebben.)

Op dit moment wordt algemeen geaccepteerd dat de rolwrijving ontstaat ten gevolge van een combinatie van de volgende zaken:

- Er worden meerdere types rol onderscheiden. Vrije rol, tractierol etc.
- Elastische hysteresie; verlies van energie aan interne materiaalwrijving bij de elastische vervorming van het materiaal.
- Slip

Voorlopig wordt gerekend met de vrije rol.

Bij vrije rol kan de rolwrijvingsfactor als volgt worden omschreven (volgens Bushan, 2013):

$$\mu_r = \frac{3\alpha a}{16R}$$

[II-6]

Hierin is:

α = hysteresefactor

a = de halve breedte in de rolrichting (ten gevolge van de Hertze spanningen)

R = radius rollende bol

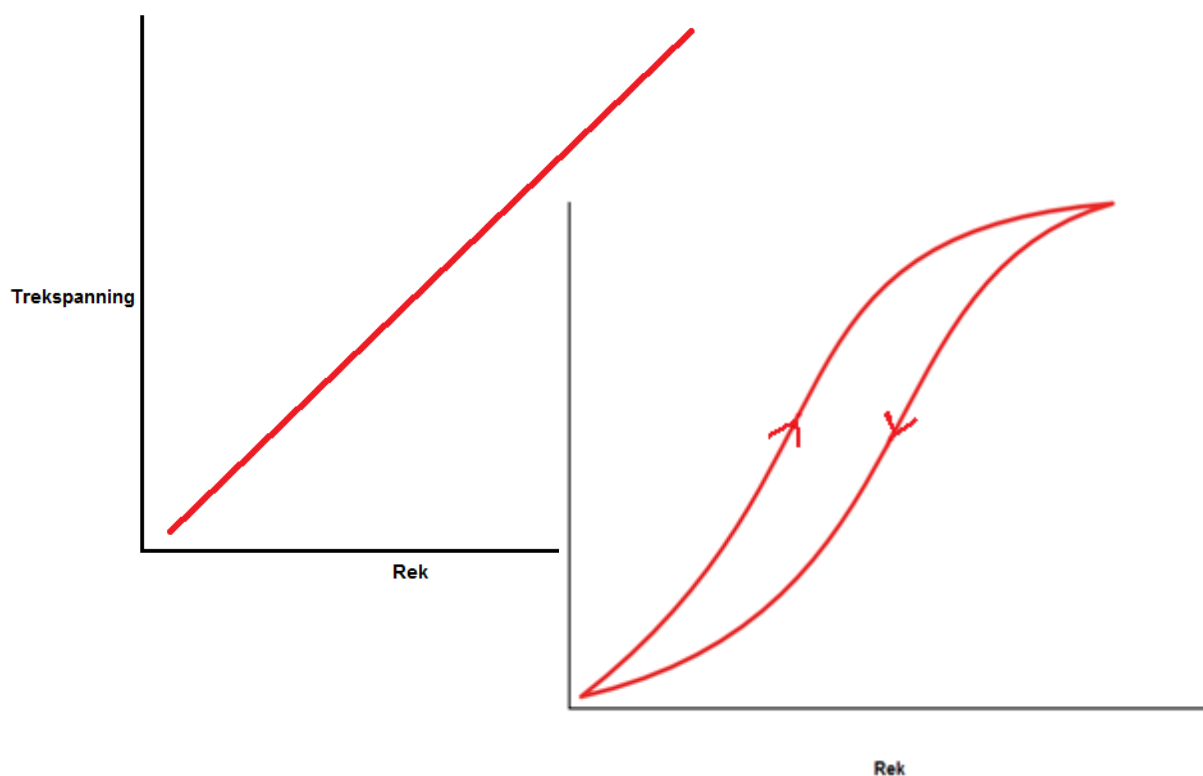
De Hertze spanningen zijn het gevolg van de normaalkracht zoals die in **vergelijking [3.10]** van het verslag is gedemonstreerd.

Bibliography

- Bhushan, B. (2013). *Introduction to tribology* (2e ed.). New York: John Wiley & Sons, Ltd.
- Bowden, F. P., & David, T. (1974). *Friction An introduction to Tribology*. London: Heinemann.
- Gao, J., Luedtke, W., Gourdon, D., Ruths, M., Israelachvili, J., & Landman, U. (2003). *Frictional forces and Amontons' Law: from the molecular to the macroscopic scale*. J. Phys. Chem. B.
- TotoBaggins. Asperities. *Asperities*. Own work. Licensed under CC BY-SA 3.0 via Wikipedia - <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Asperities.svg#/media/File:Asperities.svg>.
- University of Washington Nanolab. (sd). *Introduction to tribology - friction*. Opgeroepen op 6 15, 2015, van <http://depts.washington.edu/nanolab/ChemE554/Summaries%20ChemE%20554/Introduction%20Tribology.htm>

Energieverlies door hystereses

Wanneer een materiaal aan een kracht wordt blootgesteld, treedt er vervorming op. Deze vervorming kan plastisch (permanent) of elastisch (tijdelijk) van aard zijn. Vaak zullen materialen eerst elastisch worden vervormd, en pas als er een bepaalde grensspanning wordt overschreden zal er plastische vervorming optreden. Veelal treedt er een combinatie van beide vervormingen op. Als een materiaal dat volledig elastische eigenschappen heeft, dan zal er bij uitrekking (in het elastisch gebied) van het materiaal een hoeveelheid arbeid toegevoegd worden, die gelijk is aan de hoeveelheid arbeid uitgeoefend wordt bij het indeuken. Zoals in figuur a het geval. In werkelijkheid treedt er een effect op dat bekend staat als hystereses. Hystereses is het energieverlies dat optreedt bij elastische vervorming. Dit energieverlies ontstaat door interne wrijving. Dit betekent dus dat er in werkelijkheid meer arbeid wordt toegevoegd dan er bij het terugveren wordt verricht. In formule 6 van bijlage II wordt er verwezen naar de hystereses factor. Deze factor slaat dus op de verhouding tussen de energie die is omgezet in warmte, en de totale toegevoegde arbeid. Omdat deze factor nodig is om de rolweerstand te bepalen wordt deze factor hieronder verder uitgewerkt.



De benadering van de vervangende veerconstante.

De veerconstante [N/mm] wordt berekend met:

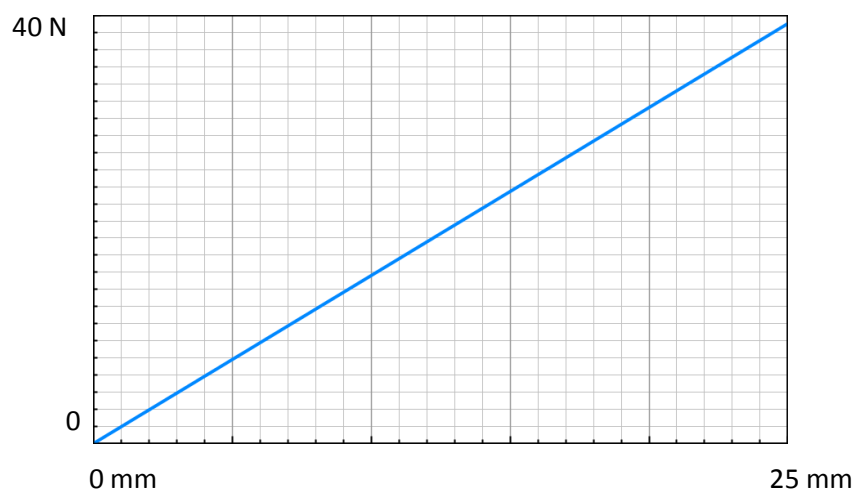
$$k = 3 \frac{F_a}{x} \quad \text{[IV-1]}$$

De kracht F_a zoals bepaald in **vergelijking 3.4**. Deze kracht werkt dus op één enkele kogelpot. Aangezien er in het ontwerp (**Figuur 6**) drie kogelpotten zijn, zal de kracht met drie vermenigvuldigd worden. De uitwijking x is in mm.

Om te analyseren of de waarde k , daadwerkelijk als lineaire constante kan worden beschouwd. Moet er gekeken worden of de kracht F_a , als eerstegraads vergelijking kan worden beschouwd. Er wordt uitgegaan van de volgende randvoorwaarden (bij benadering):

Maximale amplitude	25 mm
Massa van de gewichten op de demper	50 kg
Pendellengte	100 mm
Straal schaalte	100 mm
Trillingstijd	0,6344 [s]
ω_o	9,904 [rad/s]

Om k op deze wijze te bepalen, moet er vooraf worden nagegaan of de formule van F_a als lineair kan worden beschouwd. Daartoe wordt er eerst een plot gemaakt van de uitwijking. **Vergelijking 3.4** kan voor interval [0;25]mm worden geplot. Het resultaat staat hieronder in **Figuur IV- 1**



Figuur IV- 1 De plot van de vergelijking $F_a = \sin\left(\sin^{-1}\left(\frac{x}{r}\right)\right) \frac{1}{3} mg$ op interval [0;25]

De veerconstante k wordt bepaald middels:

$$k = \frac{F_a}{x} = \frac{40,9}{25} = 1,61 \left[\frac{n}{mm} \right] \quad [\text{IV-2}]$$

Aangezien er drie kogelpotten zijn, moet de veerconstante nog met drie worden vermenigvuldigd. De veerconstante van veren die parallel zijn gekoppeld mogen immers bij elkaar worden opgeteld.

$$K_t = K_1 + K_2 + K_3 = 4,83 \left[\frac{n}{mm} \right] \quad [\text{IV-3}]$$

De veerconstante kan worden herschreven als functie van het gewicht.

$$K_t = \frac{mg}{r} \quad [\text{IV-4}]$$

Verwaarlozen van de luchtwrijving die ontstaat ten gevolge van de beweging van de massa.

De luchtwrijving [N] wordt berekend aan de hand van:

$$F_d = \frac{1}{2} \rho v^2 c_d A_f \quad \text{[IV-5]}$$

Hierin is ρ de dichtheid van het medium (lucht) [kg/m^3], v de snelheid van de opstelling [m/s], c_d de weerstandscoefficiënt en A_f het frontaal oppervlak van de opstelling.

Als de meest ongunstige voorwaarden worden gehanteerd kan worden gesteld dat alle plaatgewichten van de proefopstelling zijn opgestapeld. Bovendien wordt er gerekend met de maximale snelheid die de proefopstelling meemaakt:

$$A_f = 8 \times 8 \times 10^{-3} \times 446 \times 10^{-3} = 0,0285 \text{ m}^2 \quad \text{[IV-6]}$$

De gemiddelde snelheid volgt uit de metingen:

$$v_{gem} = \frac{dy}{dt} = \frac{(25 - -23) \times 10^{-3}}{0,358333} = 0,13395 \text{ m/s} \quad \text{[IV-7]}$$

De snelheid is in praktijk een sinus, van de absolute waarde van deze sinus kan de maximumsnelheid worden bepaald door (1):

$$v_{max} = \frac{\pi v_{gem}}{2} = \frac{\pi \times 0,13395}{2} = 0,21041 \text{ m/s} \quad \text{[IV-8]}$$

De dichtheid van de lucht volgt uit 'the Engineering Toolbox' (2):

$$\rho = 1,294 \text{ kg/m}^3$$

De wrijvingscoëfficiënt volgt uit 'Aerodynamics for students' (3):

$$C_d = 1,17$$

Met de bovenstaande gegevens kan **vergelijking [IV-5]** volledig worden ingevuld en volgt een luchtwrijving van:

$$F_d = \frac{1}{2} 1,294 \times 0,21041^2 \times 1,17 \times 0,0285 = 0,955 \times 10^{-5} \text{ [N]}$$

Deze waarde is dusdanig klein dat deze buiten beschouwing kan worden gelaten.

Bibliografie bijlage IV

1. **Alferink, Freddy.** Avarage-effective. *Meettechniek.info*. [Online]
<http://meettechniek.info/compendium/average-effective.html>.
2. **Engineering toolbox.** Molecular mass of air. *The Engineering Toolbox*. [Online]
http://www.engineeringtoolbox.com/molecular-mass-air-d_679.html.
3. **Aerospace, Mechanical & Mechatronic University of Sydney.** Drag Coefficient. *Aerodynamics for students*. [Online] 2005. http://www-mdp.eng.cam.ac.uk/web/library/enginfo/aerothermal_dvd_only/aero/fprops/introvisc/node11.html.

Meetafwijking bij gebruik van Sony camera ten opzichte van een telefoon.

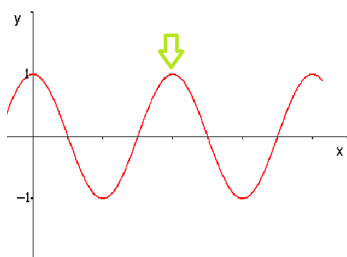
Om te bepalen welke camera gebruikt moet worden moet de trillingstijd (slingertijd) van de demper in de proefopstelling worden ingeschat. Uiteraard zal het uiteindelijke ontwerp hierop nog van invloed zijn, als voorlopig wordt uitgegaan van;

Opnamesnelheid digitale camera (burst-mode)	10 [bps]
Opnamesnelheid digitale camera (videostand)	50 [bps]
Opnamesnelheid telefoon	120 [bps]
Frequentie F_s is omgekeerd evenredig met de opnamesnelheid	[sec]
Pendellengte l	100 [mm]
Straal schaalte r	100 [mm]
Trillingstijd $T_o = 2\pi\sqrt{\frac{l}{9,81}} = 2\pi\sqrt{\frac{0,1}{9,81}} = 0,6344$ [s]	0,6344 [s]
Hoeksnelheid $\omega_o = \frac{2\pi}{T} = 9,904$ [rad/s]	9,904 [rad/s]

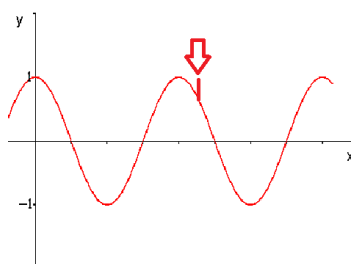
Tabel V-1 gegevens proefopstelling

Met de bovenstaande gegevens kan een omschrijving worden gegeven van de slingering aan de hand van een sinusoïde.

- De amplitude van deze vergelijking maakt niet uit;
- Het is voor het decrement alleen interessant om de onnauwkeurigheid bij het opmeten van de uiterste stand te weten;
- Voor de bepaling van de nauwkeurigheid is het decrement niet belangrijk;
- Er wordt onderscheid gemaakt tussen gunstige (**Figuur V-1**) en ongunstige (**Figuur V-2**) beelden. Een gunstig beeld valt precies samen met de uiterste stand van de uitwijking (piek). Een ongunstig beeld valt buiten een piek;
- In het meest ongunstige geval valt het beeld zo ver als mogelijk naast de top $\frac{F_s}{2}$ [sec] naast de top;
- De nauwkeurigheid wordt bepaald door de meest ongunstige meting.



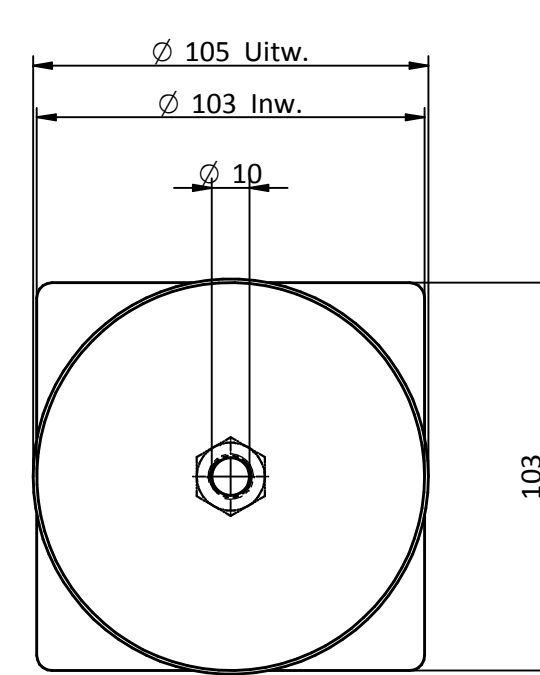
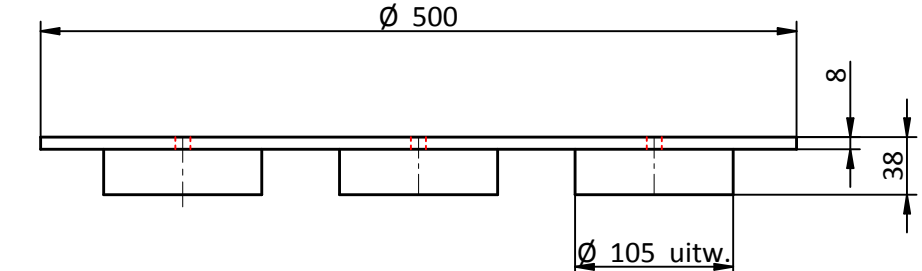
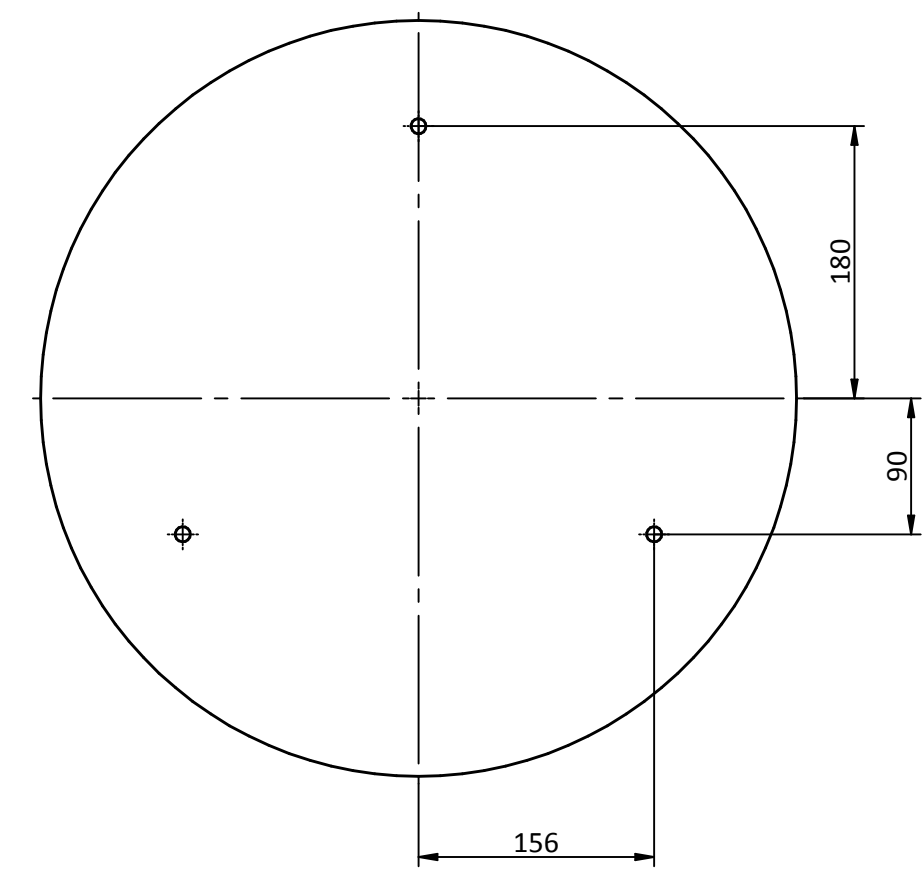
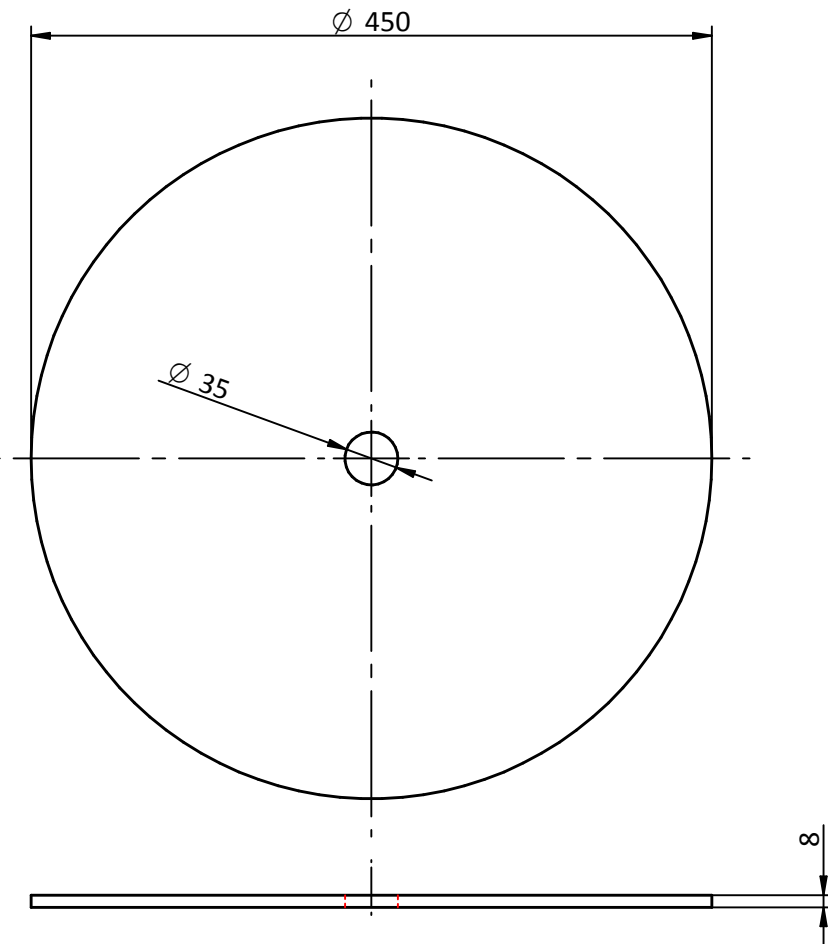
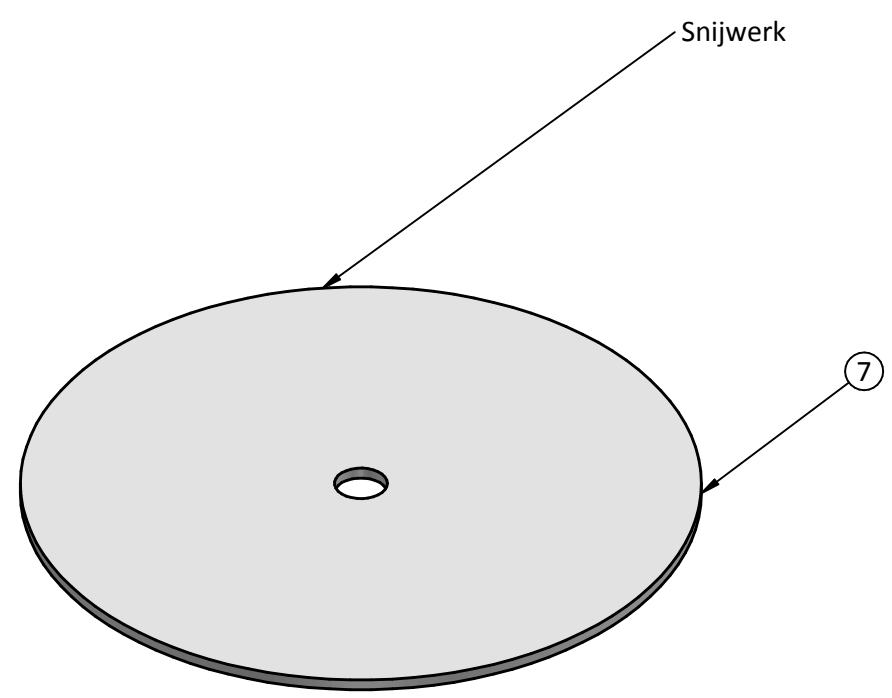
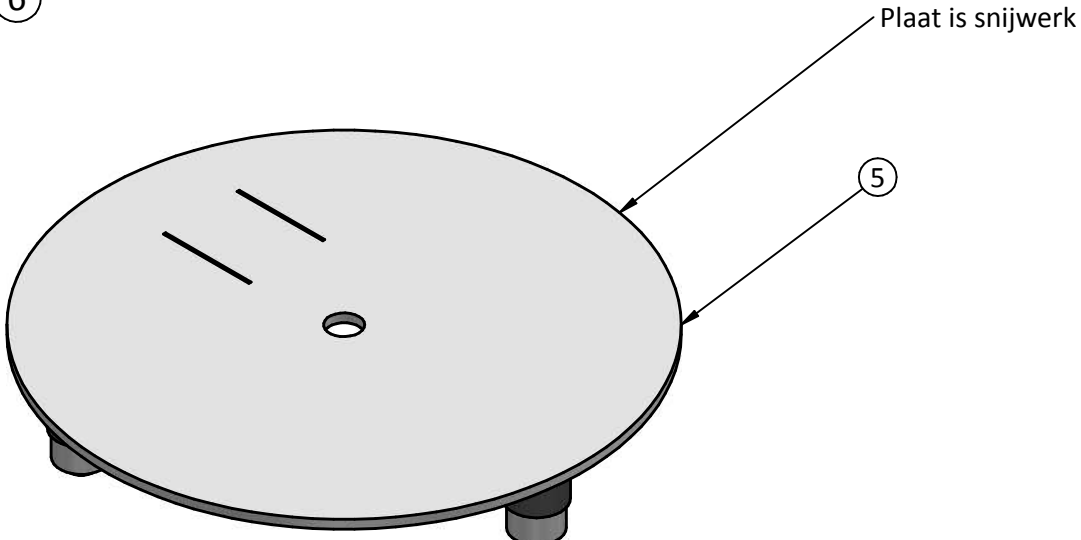
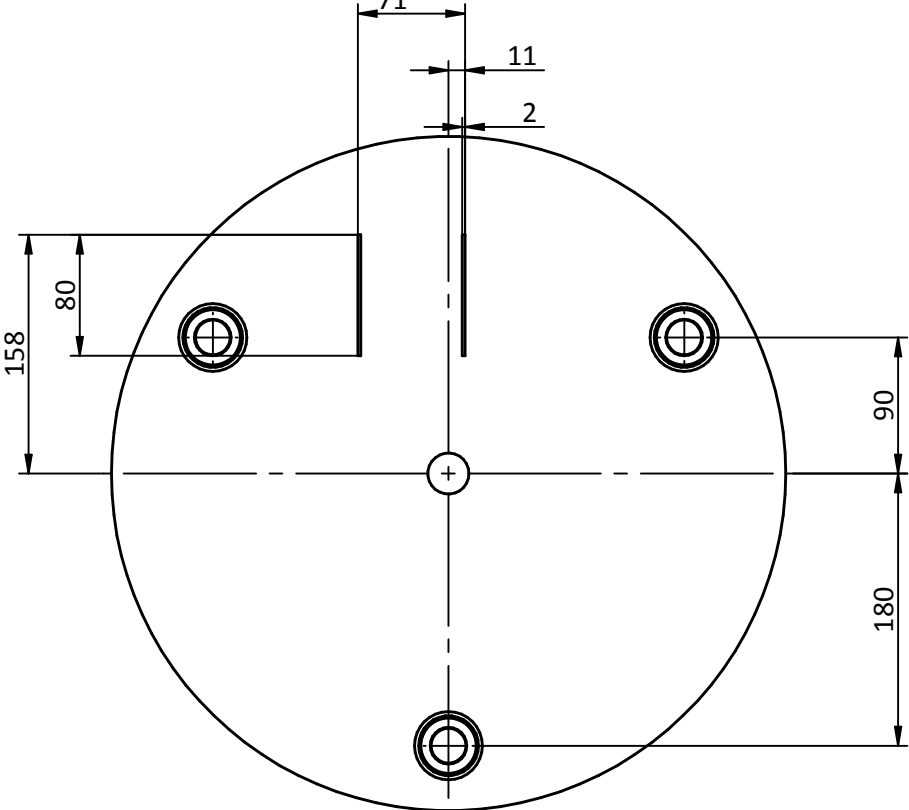
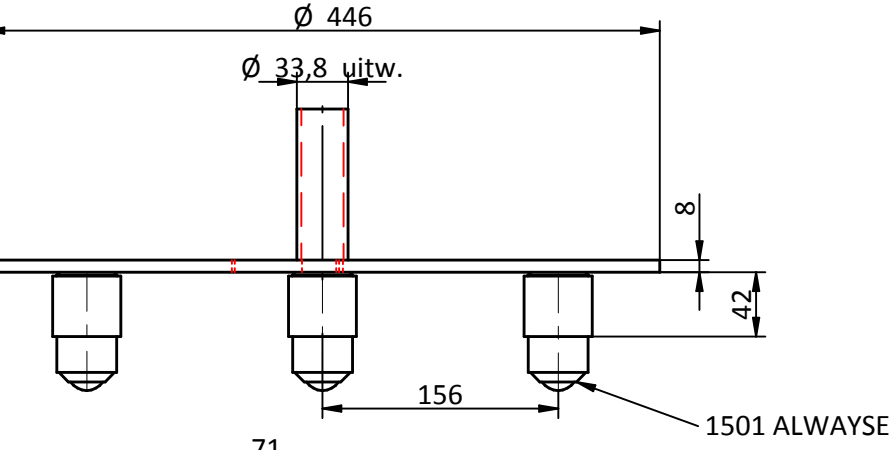
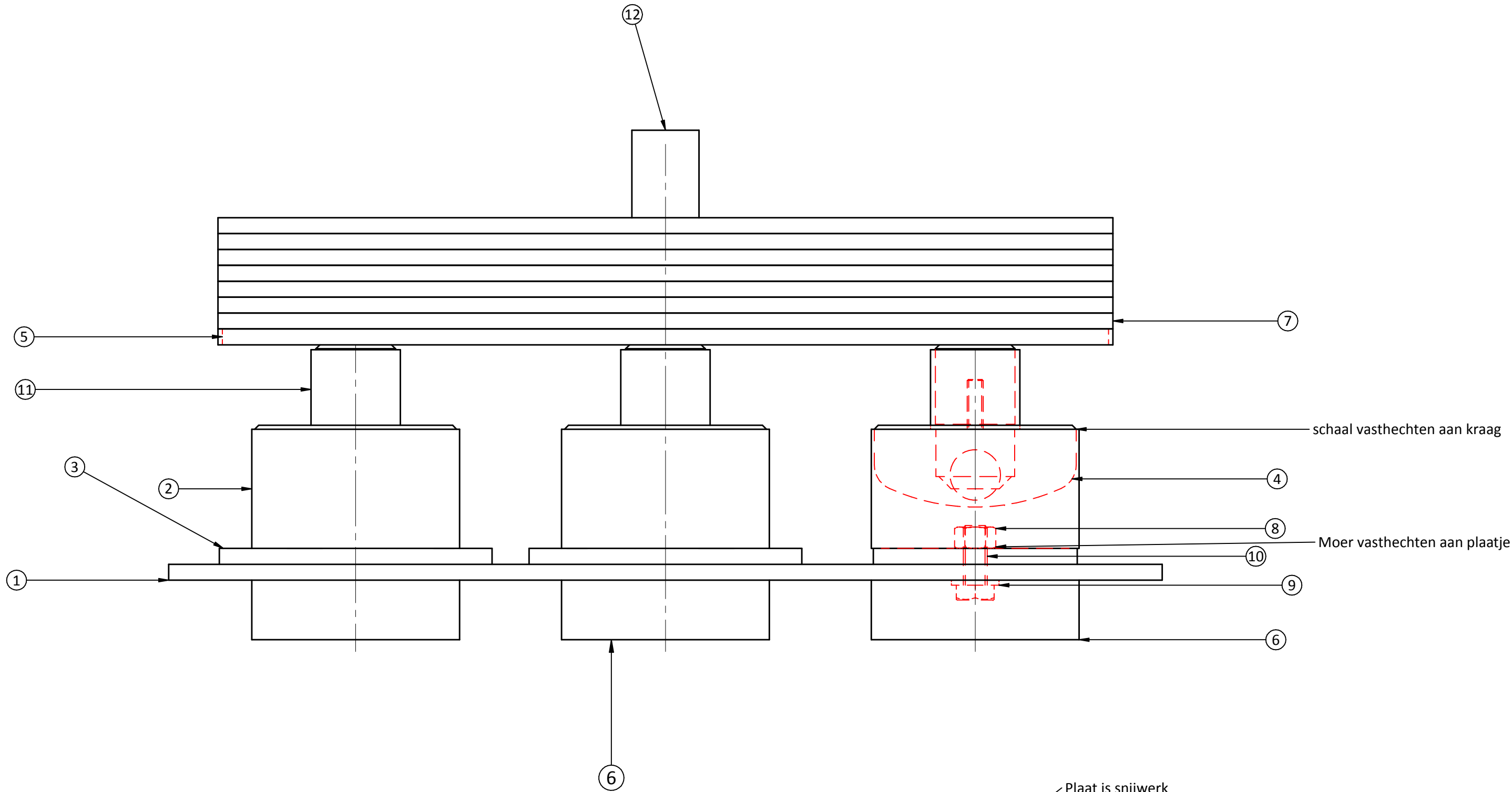
Figuur V-2 gunstig



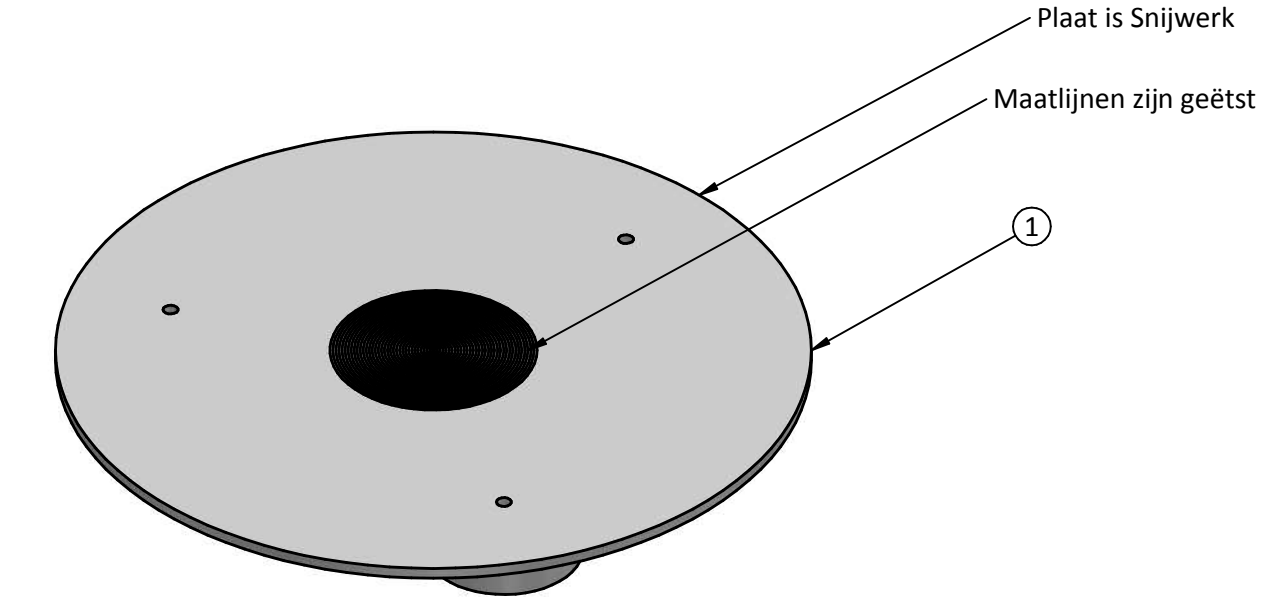
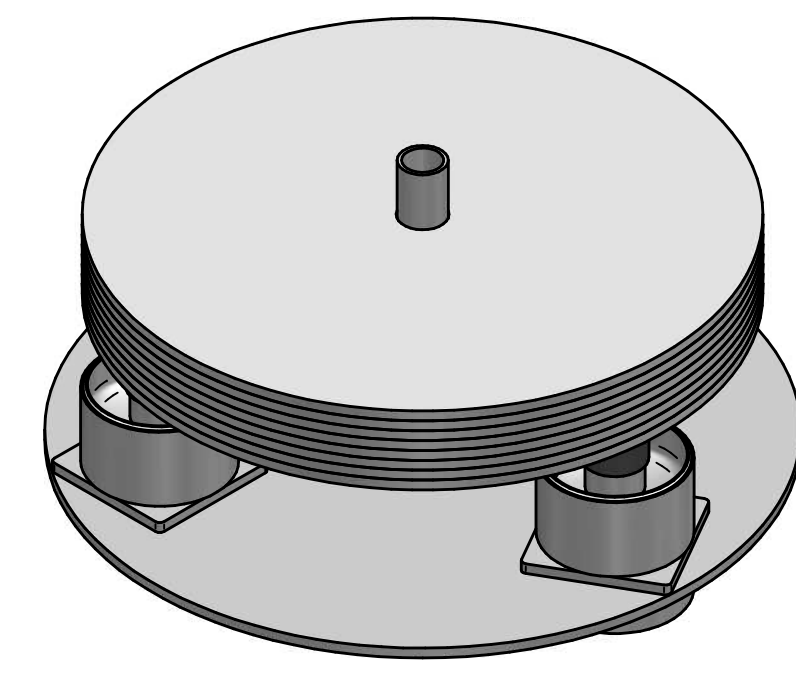
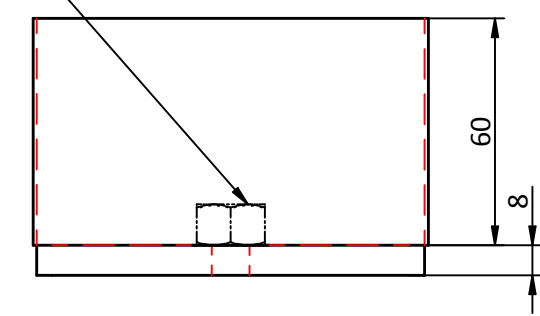
Figuur V-1 ongunstig

- De vergelijking voor de uitwijking is: $y = \cos(9,904t)$
Voor de burst-mode van de camera zou de grootste afwijking onder andere plaatsvinden op $t=0,05$ seconde (aangezien $t=0$ een maximale uitwijking heeft, en dus een gunstig beeld zou geven.) Dit invullen in de vergelijking geeft $y = 0,8799$ dit is een afwijking van $0,1201$ ten opzichte van de maximale uitwijking (dat zou immers 1 zijn), dus een **afwijking van ruim 12%**
- Voor de videostand wordt $t=0,01$ seconde, dit geeft een $y = 0,995$, dus een **afwijking van 0,49%**
- Voor de videostand wordt $t=240^{-1}$ seconde, dit geeft een $y = 0,999$ dus een **afwijking van 0,085%**

Conclusie: een hoger aantal beelden per seconde resulteert in aanzienlijk meer nauwkeurigheid



Moer vastlassen boven Ø10 gat



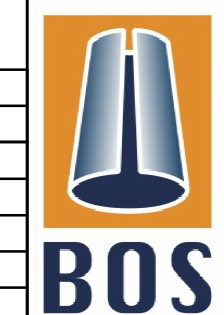
Massa ±120 kg

12	1	Pen	1.0038 (S235 JR)	Ø33,8 uitw. L=100	Gebruik beschikbare buisje
11	3	Kogelpot type 1501	1.4404 (RVS-316L)	ø40	Always, type 1501
10	6	Bout		M12x30	DIN933
9	6	Ring		M12	DIN125-1A
8	3	Moer		M12	DIN931
7	8	Plaatgewicht	1.0038 (S235 JR)	Ø450 t=8	Snijwerk
6	3	Poten	1.0038 (S235 JR)	Ø105 h=30	Gebruik aanwezige pijp
5	1	Plaat met pen	1.0038 (S235 JR)	Ø446 T=8	Snijwerk
4	3	Schaal (Klopperbodem)	1.4404 (RVS-316L)	Ø101,6 (inkoop)	DIN28011
3	3	Bodemplaat kraag	1.0038 (S235 JR)	T=8	
2	3	Kraag	1.0038 (S235 JR)	102,6 uitwendig	Gebruik aanwezige buis
1	1	Bodemplaat	1.0038 (S235 JR)	Ø500	Snijwerk, geëteerde zijde moet naar boven staan!
IC	Posnr	Aantal	Benaming	Materialen en/of Halffabrikaten	Afmeting en/of Normaanduiding
Opmerkingen					

Project gegevens					
Opstelling	buiten/binnen	Opp. behandeling	-		
Ontwerptemperatuur	-	Coating inwendig	-		
Bedrijfstemperatuur	-	Coating uitwendig	1ste -		
Ontwerpdruk	-		2de -		
Lassen vigs. WPS	-		3de -		
Lasonderzoek	-	Eindkleur vigs.	-		
Norm lasonderzoek	-	Beitsen / Passiveren	-		
Alle niet aangegeven lassen a=3mm			Langsnaden 180 ° verdraaien		
Maten met ☐ tolerantie +/- 1mm			Gaten op steek en steekcirkels +/- 1mm		
EN ISO 13920	2 t/m 30 ± 1mm	31 t/m 120 ± 3mm	121 t/m 400 ± 4mm	401 t/m 1000 ± 6mm	1001 t/m 2000 ± 8mm
Maattol. C				2001 t/m 4000 ± 11mm	4001 t/m 8000 ± 14mm

Rev.	Datum	Omschrijving	Getekend : jk
			Gecontroleerd : -
			Vrijgave : Ir. CB
			Schaal : 1:
			Datum : 4-6-2015
			Maateenheid : mm
Benaming : Proefopstelling			Projectie :
Order nr. :			Tek.nr. :
Referentie : Afstuderen Jon			Rev. formaat A1
Auteursrechten als vastgesteld in onze algemene leveringsvoorwaarden en condities.			

Afdeling	Datum afgifte
Engineering	
Montage	
Inkoop	
Staal	
RVS / Alum.	
Isolatie	
Magazijn	
Eindcontrole	



Competentie set ten behoeve van de stage

Huidige competenties per taakrol

Student naam	Jon-Danilo Kortram
nummer	11110333

Taakrollen		Onderzoeker	Ontwerper	Adviseur	Beheerder	Projectleider	Ondernemer
Competentieset Werktuigbouwkunde & HBO Algemeen							
nr.	Competentieset Werktuigbouwkunde						
1	Projectmanagement uitvoeren (organiseren, uitvoeren, verslag opstellen)	3					
2	Een onderzoeksopdracht uitvoeren	4					
3	Het kunnen opstellen van een productdefinitie, PVA en PVE voor een duurzaam product of proces	3					
4	Het realiseren van een functioneel duurzaam product of voortbrengingsproces	4					
5	Het realiseren van een detailontwerp van een duurzaam product of voortbrengingsproces						
6	Het realiseren van een prototype/model van een duurzaam product of voortbrengingsproces						
7	Het voorbereiden van een voortbrengingsproces						
8	Het produceren van een duurzaam product						
9	Het geheren of onderhouden van een product of proces						
nr.	Algemene HBO competenties						
10	Kritisch handelen (analytisch en probleemoplossend vermogen en het onderbouwen van keuzen, oordeelsvorming)	4					
11	Systematisch een probleem aanpakken (creatieve, plan- en projectmatige werkhouding)	4					
12	Samenwerken (sociaal communicatieve vaardigheden)	3					
13	Persoonlijke en professionele ontwikkeling	3					
14	Zelfverantwoordelijk werken	3					
15	Kunnen functioneren in een internationale en/of multiculturele context						

Overzicht Competenties Niveaus				
		Taakrol		
		Geleid	Zelfstandig	Sturend
Context	Simpel	1	2	3
	Lastig	2	3	4
	Complex	3	4	5

Voor de stage geldt dat de relevante competenties naar minimaal het niveau 2 worden ontwikkeld.

Competentie set ten behoeve van de stage

Mogelijke competenties per taakrol

Student naam	Jon-Danilo Kortram
nummer	11110333

Taakrollen		Onderzoeker	Ontwerper	Adviseur	Beheerder	Projectleider	Ondernemer
Competentieset Werktuigbouwkunde & HBO Algemeen							
nr.	Competentieset Werktuigbouwkunde						
1	Projectmanagement uitvoeren (organiseren, uitvoeren, verslag opstellen)	3→4					
2	Een onderzoeksopdracht uitvoeren						
3	Het kunnen opstellen van een productdefinitie, PVA en PVE voor een duurzaam product of proces						
4	Het realiseren van een functioneel duurzaam product of voortbrengingsproces						
5	Het realiseren van een detailontwerp van een duurzaam product of voortbrengingsproces						
6	Het realiseren van een prototype/model van een duurzaam product of voortbrengingsproces						
7	Het voorbereiden van een voortbrengingsproces						
8	Het produceren van een duurzaam product						
9	Het geheren of onderhouden van een product of proces						
nr.	Algemene HBO competenties						
10	Kritisch handelen (analytisch en probleemoplossend vermogen en het onderbouwen van keuzen, oordeelsvorming)						
11	Systematisch een probleem aanpakken (creatieve, plan- en projectmatige werkhouding)						
12	Samenwerken (sociaal communicatieve vaardigheden)						
13	Persoonlijke en professionele ontwikkeling	3→4					
14	Zelfverantwoordelijk werken						
15	Kunnen functioneren in een internationale en/of multiculturele context						

Overzicht Competenties Niveaus				
		Taakrol		
		Geleid	Zelfstandig	Sturend
Context	Simpel	1	2	3
	Lastig	2	3 ↓	4
	Complex	3	4	5

Voor de stage geldt dat de relevante competenties naar minimaal het niveau 2 worden ontwikkeld.

De specifieke werktuigbouwkundige competentie die ik ga ontwikkelen is het projectmanagement uitvoeren. Hieronder valt onder andere het opstellen van het verslag. Als onderzoeker, is het “project” dat ik uitvoer het onderzoek, de voorbereiding, uitvoer en de verslaglegging die ik tijdens mijn literatuurstudie zal uitvoeren zal ertoe leiden dat mijn competentie in dit opzicht vooruitgaat. Hiervoor was ik al in staat om deze taakrol zelfstandig, in een lastige context uit te voeren. De huidige context zal dusdanig complex zijn, dat het niveau van de competentie naar niveau 4 zal worden getild.

De algemene HBO competentie die ik verder zal ontwikkelen is mijn persoonlijke professionele ontwikkeling. Hetgeen tot stand zal komen door, de zelfstandige uitvoer van de opdracht, in combinatie met een complexe context.