BOS NIEUWERKERK

# Demping van trillingen in schoorstenen

## Demping door middel van interne materiaalwrijving

**Auteur:** **Willem A. Verbruggen**
**Studentnummer:** **10102450**

**Datum:** **2 – juni – 2016**
**Plaats:** **Delft**
**Begeleiders HHS:** **Dhr. A.C. Taal & dhr. R.F. Meijs**

*“If you want to find the secrets of the universe, think in terms of energy, frequency and vibration.”*

— Nikola Tesla

# Voorwoord

Dit rapport is onderdeel van mijn afstudeeronderzoek. Dit onderzoek is uitgevoerd in het kader van mijn afstuderen van de opleiding werktuigbouwkunde aan de Haagse Hogeschool te Delft. De opdrachtgever voor dit onderzoek is Bos Nieuwerkerk B.V. De resultaten van het onderzoek worden beschreven in dit rapport.

Ik wil graag mijn collega's bedanken voor de gezelligheid en behulpzaamheid tijdens de afgelopen maanden. In het bijzonder wil ik de heren M. Reijm en W. Braat bedanken voor het helpen met het bouwen van mijn proefopstelling en het denken in oplossingen als ik vast liep in mijn ontwerp.

Ook wil ik mijn bedrijfsbegeleider dhr. C. Bezemer bedanken voor zijn geduld en bereidheid om mijn vragen te beantwoorden. En natuurlijk voor zijn begrip voor alle keren dat ik de cappuccino ben vergeten te halen.

Tot slot wil ik mijn begeleider vanuit de Haagse Hogeschool, dhr. A. Taal bedanken voor zijn feedback en hulp.

*Willem A. Verbruggen*

# Samenvatting

Bos Nieuwerkerk is een bedrijf dat schoorstenen maakt van aluminium en staal voor de industrie. Afhankelijk van de hoogte, diameter, wanddikte, etc. is een schoorsteen gevoelig voor dwarstrillingen ten opzichte van de windrichting. Deze trillingen zijn ongewenst omdat ze tot vermoeiingsverschijnselen kunnen leiden. Om te voorkomen dat de schoorsteen beschadigd door deze gevolgen moeten er maatregelingen worden getroffen. Een van de mogelijke oplossingen is het toepassen van een trillingdemper. Een probleem bij de trillingdempers dit nu worden toegepast is het onderhoud. Vanuit R&D is door Bos Nieuwerkerk een voorstel gedaan om een demper te onderzoeken waarbij de demping is gebaseerd op interne materiaalwrijving. Een groot voordeel van dit ontwerp is de onderhoudsarme constructie.

Tijdens het onderzoek is er met behulp van een proefopstelling gekeken naar het effect van een variërende massa op de demping een eenzijdig ingeklemde staaf. Dit proces is herhaald voor een toepassing waarbij gebruik werd gemaakt van een rubber inklemming.

In dit rapport wordt de wiskundige theorie achter massa-veer-demper systemen behandeld om een beter begrip te krijgen de processen. Met behulp van deze kennis is er met methodisch ontwerpen een proefopstelling ontwikkeld. De resultaten van de proeven zijn geanalyseerd met behulp van datasheets in Excel. Hieruit is naar voren gekomen dat de materiaaldemping van een stalen cantilever erg laag is. In de situatie waarbij gebruik wordt gemaakt van rubber is de demping aantoonbaar hoger maar nog steeds significant lager dan de trillingdempers die momenteel worden toegepast. Indien een schoorsteen niet al te veel gedempt hoeft te worden zou de uitvoering met rubber voldoende kunnen zijn bij toepassing van een aantal dempers.

Er is een concept demper uitgewerkt waarbij theoretisch een hogere demping kan worden behaald. Er zijn echter veel onzekerheden en het wordt dan ook aangeraden om een test uit te voeren op ware grote.

# Inhoud

Voorwoord ..... 4
Samenvatting ..... 5
Verklarende woordenlijst ..... 8
Symbolenlijst ..... 9
1. Inleiding ..... 11
1.1 Bedrijfsprofiel ..... 11
1.2 Aanleiding om een demper toe te passen ..... 11
1.3 Opdrachtomschrijving ..... 12
1.4 Opbouw rapport ..... 13
2. Oriëntatie onderzoek ..... 14
2.1 Literatuurstudie naar de trillingdemper ..... 15
2.1.1 Reden om een trillingdemper toe te passen ..... 15
2.1.2 Doel van een trillingdemper ..... 16
2.1.3 Toegepaste trillingsdempers ..... 17
2.1.4 Functioneren van een trillingdemper ..... 18
2.1.5 Functioneren van een demper op een schoorsteen ..... 19
2.2 Logaritmisch decrement ..... 21
2.3 Uitwijking een cantilever ..... 22
2.4 Bepaling amplitude verhouding ..... 24
2.5 Bepaling eigenfrequentie van de proef ..... 26
2.6 Werkwijze voor het bepalen van de demping ..... 27
3. Analyse de cantilever ..... 28
3.1 Een massa-interne-wrijving-systeem ..... 28
3.2 Energieomzetting bij vervorming van materialen ..... 29
3.2.1 Hysteresis bij vervorming ..... 30
3.2.2 Visco elasticiteit ..... 31
4. De proefopstelling ..... 35
4.1 Methodisch ontwerpen voor proefopstelling ..... 36
4.2 Uiteindelijk ontwerp ..... 38
5. Meetresultaten ..... 40
5.1 De meetmethode ..... 40
5.2 Gemiddelde demping van meerdere metingen ..... 41
5.3 De onderzoeksresultaten vergelijken ..... 43

5.4 Toepassing ..... 44
6. Conclusie ..... 45
7. Aanbevelingen ..... 46
8. Bibliografie ..... 47
9. Bijlagen ..... 48

# Verklarende woordenlijst

| | |
|---|---|
| **Cantilever** | Een eenzijdig ingeklemde staaf of balk |
| **Eigenfrequentie** | De frequentie waarmee een massa gaat trillen als het uitwijking krijgt en vervolgens wordt losgelaten |
| **Hydraulische demper** | Type trillingdemper dat wordt toegepast op schoorstenen |
| **Hysteresis** | Energieverlies ten gevolge van interne materiaalwrijving |
| **Kritische windsnelheid** | Bij deze windsnelheid zullen de loslatende wervelingen tot gevolg hebben dat de schoorsteen in zijn eigen frequentie gaat trillen |
| **Logaritmisch decrement** | Natuurlijke logaritmische verhouding tussen de amplitudes van opeenvolgende trillingen |
| **Pendellengte** | Afstand van het middelpunt van een massa tot het ophangpunt van de pendel. |
| **Rol-ring-demper** | Type trillingdemper dat wordt toegepast op schoorstenen |
| **Vermoeiingsverschijnselen** | Materiaalmoeheid, fenomeen waarbij materiaal bij een aanhoudende wisselende belasting bezwijkt |

# Symbolenlijst

| | | |
|---|---|---|
| $a$ | Amplitude | [m] |
| $A$ | Amplitude | [mm] |
| $A_n$ | Amplitude na 'n' aantal trillingen | [mm] |
| $A_f$ | Frontaal oppervlak | [$m^2$] |
| $b$ | Uitwendige diameter | [m] |
| $c$ | Dempingconstante | [Ns/m] |
| $C_{cr}$ | Kritische demping | [Ns/m] |
| $d$ | Diameter | [m] |
| $E$ | Elasticiteitsmodulus | [Gpa, kN/$mm^2$, N/$m^2$] |
| $E'$ | Trek opslagmodulus | [-] |
| $E''$ | Trek verliesmodulus | [-] |
| $f$ | Frequentie | [Hertz] |
| $f_0$ | Eigenfrequentie | [Hertz] |
| $f_n$ | Eigenfrequentie schoorsteen | [Hertz] |
| $F_v$ | Veerkracht | [N] |
| $F_s$ | Normaalkracht van de staaf | [N] |
| $F_z$ | Zwaartekracht | [N] |
| $G$ | Afschuif modulus | [-] |
| $G'$ | Afschuif opslagmodulus | [-] |
| $G''$ | Afschuif verliesmodulus | [-] |
| $I$ | Oppervlaktetraagheidsmoment | [$mm^4$] |
| $i$ | Complex getal | [-] |
| $k$ | veerconstante | [N/mm] |
| $L$ | Lengte | [mm] |
| $m$ | Massa | [kg] |
| $n$ | Aantal trillingen/metingen 'n' | [-] |
| $P_1$ | Kracht op de demper | [N] |
| $P_2$ | Kracht op de schoorsteen | [N] |
| $r$ | Straal cirkel | [mm] |
| $S$ | Getal van Strouhal | [-] |
| $t$ | Tijd | [s] |
| $t_w$ | Wanddikte van de schoorsteen | [m] |
| $\tilde{v}$ | Coëfficiënt van Poisson | [-] |
| $v_c$ | Kritieke windsnelheid | [m/s] |
| $\bar{v}$ | Windsnelheid | [m/s] |
| $v_{max}$ | Maximale uitwijking | [m] |
| $x$ | Verplaatsing ten opzichte van de tijd | [m] |
| $\dot{x}$ | Eerste afgeleide naar de tijd van de verplaatsing | [m/s] |
| $\ddot{x}$ | Tweede afgeleide naar de tijd van de verplaatsing | [m/$s^2$] |
| $W$ | Arbeid | [W] |

| | | |
|---|---|---|
| $\delta$ | Faseverschil tussen spanning en rek | [-] |
| $\delta$ | Dempingcoëfficiënt | [-] |
| $\theta$ | Hoek | [° graden] |
| $\epsilon$ | Rek | [%] |
| $\sigma$ | Spanning | [N/m$^2$] |
| $\lambda$ | Logaritmisch decrement | [-] |
| $\mu_s$ | Massa per oppervlakte eenheid | [kg/m$^2$] |
| $\omega_0$ | Hoeksnelheid | [rad/s] |

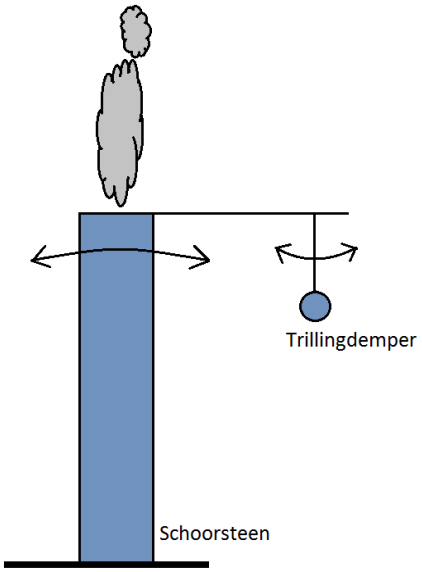
# 1. Inleiding

## 1.1 Bedrijfsprofiel

Bos Nieuwerkerk is een familiebedrijf dat industriële schoorstenen fabriceert. Dit familiebedrijf is opgericht in 1973. Bos Nieuwerkerk levert maatwerk in overleg met haar opdrachtgevers. De producten worden door Bos Nieuwerkerk zelf ontworpen en geproduceerd. In het begin leverde Bos Nieuwerkerk alleen aluminium schoorstenen aan de tuinbouw. Deze waren nodig ter vervanging van de bestaande gemetselde schoorstenen omdat er voor de verwarming van de kassen werd overgeschakeld van olie op gas. De gemetselde schoorstenen bleken minder goed bestand tegen deze rookgassen.

## 1.2 Aanleiding om een demper toe te passen

De schoorstenen van Bos Nieuwerkerk worden ontworpen volgens de Eurocode. Afhankelijk van de hoogte, diameter, wanddikte, etc. is een schoorsteen gevoelig voor dwarstrillingen ten opzichte van de windrichting. (Ter gevolgen van de Von Kármán wervels). Dit kan leiden tot vermoeiingsverschijnselen. Indien dit het geval is moeten er maatregelen worden getroffen om de trillingsbeweging en daarmee de optredende spanning te beperken. Een van de mogelijke oplossingen is het toepassen van een trillingdemper. In figuur 1 is een schets te zien van een schoorsteen met een trillingdemper. Een trillingdemper is met behulp van flens aan de top van de schoorsteen bevestigd. Als de schoorsteen beweegt geeft hij deze energie door aan de trillingdemper. Doordat in de demper de bewegingsenergie wordt afgevoerd in de vorm van warmte dempt de trilling uit.

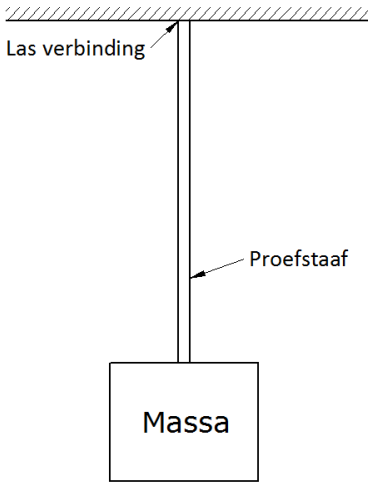



Figuur 1.1. Schoorsteen met trillingdemper

## 1.3 Opdrachtomschrijving

Op dit moment wordt er gebruik gemaakt van twee vormen van trillingsdempers; de hydraulische trillingsdempers en de rol-ring-demper. Om te berekenen welke trillingdemper nodig is, moet de eigenfrequentie van de schoorsteen bekend zijn. Daarnaast moet het dempingswaarde van de trillingdemper bekend zijn. Van hydraulische dempers kan deze dempingswaarde bij de leverancier worden opgevraagd. Bovendien is dit type trillingsdempers vaak te verstellen. Het alternatief is de rol-ring-demper. Uit eerder onderzoek is alleen gebleken dat de werkelijke dempingswaarde lager is dan de softwarematig berekende waarde. Beide systemen moeten worden onderhouden. Hierbij is de rol-ring-demper onderhoudsgevoeliger dan de hydraulische demper. Bij de kleinere schoorstenen is een hydraulische demper relatief duur. Bos Nieuwerkerk is heeft dan ook behoefte aan een systeem dat onderhoudsarm is en waarbij ook rekening wordt gehouden met de kosten.

Het voorstel vanuit R&D voor het te onderzoeken dempingprincipe ziet er als volgt uit:




**Figuur 1.2. Demperontwerp: gewicht met vaste verbinding aan flens. Met een andere woorden: een ingeklemde pendulum.**

Aan een flens wordt een staaf bevestigd. Dit moet worden gezien als een vaste inklemming. Aan deze staaf hangt een massa. Door dat de staaf kan buigen gaat de massa bewegen. De demping wordt veroorzaakt doordat er interne materiaalwrijving optreedt in de staaf.

Het doel van de opdracht is het onderzoeken van de mogelijkheid om een ingeklemde staaf, voorzien van een massa toe te passen als trillingdemper voor een schoorsteen.
Het inklemmen dient op twee verschillende manieren te gebeuren:

1. Vaste inklemming
2. Staaf pendelend ophangen en inklemmen in rubber.

Als richtlijn voor de uitvoer van deze opdracht is de volgende onderzoeksvraag opgesteld:

*Wat is de natuurlijk dempingswaarde van een staaf in een situatie zoals geschetst in figuur 2?*

Het onderzoek beperkt zich tot een eigenfrequentie bereik van minimaal 1 tot maximaal 5 Hz.
Het onderzoek zal in meerdere fasen worden uitgevoerd, deze fases zijn onder te verdelen in onderzoeksvragen:

- Hoe kan de dempingswaarde worden bepaald?
- Wat betekent het begrip hysteresis in voor staal en rubber?
- Hoe moet de meetopstelling ontworpen en gebouwd worden?
- Hoe worden meetresultaten vastgelegd?
- Hoe ziet wordt de dempingswaarde beïnvloed door verschillende massa's en lengtes? Waarbij de massa maximaal 80 kg bedraagt.
- Wat is de invloed van inklemmen d.m.v. rubber?
- Is dit ontwerp toepasbaar in de praktijk?

Daarnaast moeten de meetresultaten worden uitgewerkt met als resultaat het logaritmisch decrement van de diverse configuraties.

## 1.4 Opbouw rapport

Dit rapport begint met een literatuuronderzoek naar trillingsdempers en theorie hierachter. Dit is de oriëntatiefase, hoofdstuk 2. Hierin wordt uitgelegd wat het doel is van trillingsdempers en waarom ze worden toegepast op schoorstenen. Ook wordt het functioneren van het systeem besproken en wiskundig onderbouwd. Aan het eind van de oriëntatie wordt met de opgedane kennis een methode opgesteld om naar een oplossing te werken voor de probleemstelling.
In hoofdstuk 3 volgt een analyse van het voorgestelde systeem. De krachten die in werking treden bij het aanstoten van dit systeem worden besproken. Tevens wordt er dieper in gegaan op demping door interne wrijving. Dit fenomeen heet hysteresis en zal in paragraaf 3.2.1 worden behandeld.
Om de theorie te testen moet er een proefopstelling worden gebouwd. Het ontwerpen hiervan wordt in hoofdstuk 4 besproken. Dit zal worden gedaan op de manier van methodisch ontwerpen. In de laatste paragraaf van dit hoofdstuk zal het uiteindelijke ontwerp worden toegelicht.

Nadat de proefopstelling is voltooid kunnen de metingen worden uitgevoerd. De meetgegevens en de manier waarop deze zijn verwerkt wordt in hoofdstuk 5 behandeld. Ook zullen de proefresultaten onderling worden vergeleken. Afsluitend volgt in hoofdstuk 6 de conclusie.
Hoofdstuk 8 en 9 bevatten respectievelijk de bronvermelding en de bijlagen.

## 2. Oriëntatie onderzoek

Schoorstenen worden continu blootgesteld aan de elementen. Het grootste gevaar hierbij is de wind. Door de wind kan een schoorsteen gaan schommelen. Met andere woorden, de schoorsteen gaat trillen in de eigenfrequentie. De schoorsteen functioneert op deze manier als een massa-veer-demper-systeem. De trillingen leiden tot wisselspanningen in de schoorsteen en die hebben als gevolg dat er vermoeiing optreedt in het materiaal. De vermoeiing is ongewenst omdat het de schoorsteen kan beschadigen en zo zijn levensduur verkort.

Bij aanvang van de oriëntatiefase zijn een aantal kernvragen opgesteld om meer duidelijkheid te krijgen. De volgende kernvragen zijn gesteld tijdens het onderzoek:

- Waarom is het nodig om een trillingdemper toe te passen?
- Hoe functioneert een trillingdemper?
- Welke dempers worden er nu toegepast?
- Hoe werkt de combinatie schoorsteen + demper?
- Hoe wordt de demping uitgedrukt?

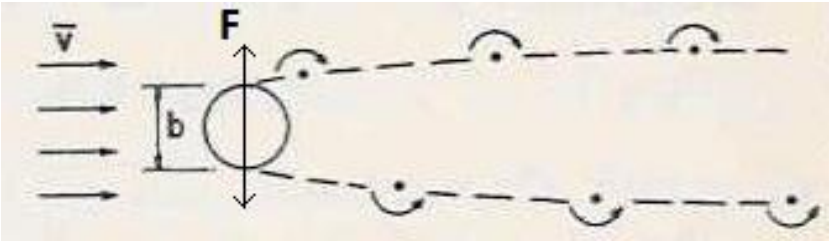
Met deze vragen in gedachten is het onderzoek gestart.

## 2.1 Literatuurstudie naar de trillingdemper

In deze paragraaf wordt de oriëntatiefase behandeld. Tijdens deze fase is er onderzoek gedaan naar de theoretische achtergrond van massa-veer-demper-systemen en hoe trillingsdempers worden toegepast op schoorstenen.

### 2.1.1 Reden om een trillingdemper toe te passen

Als een luchtstroom langs een schoorsteen beweegt ontstaat er een patroon van wervels door het onstabiel loslaten van de luchtstroom langs het oppervlak. Bij het loskomen deze wervels ontstaat er onderdruk aan de zijkanten van de schoorsteen. In figuur 2.1 zijn dit de boven en onderkant van de cirkel. Dit heeft als gevolg dat er een kracht haaks op de windrichting ontstaat. Deze wervels worden ook wel de Von Kármán wervels genoemd.




Figuur 2.1. Het ontstaan van een wervelstraat van Von Kármán. (Vandepitte, Wervelstraat)

De wervels vormen een patroon wat ook wel een wervelstraat wordt genoemd. In figuur 2.1 is een schematische weergave te zien van lucht die langs de doorsnede van een pijp beweegt. Achter de doorsnede ontstaat de wervelstraat. De frequentie waarmee deze wervels ontstaan is gelijk aan (NEN-EN-1991-1-4, 2005):

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

In deze vergelijking wordt de frequentie gegeven door f, b is de diameter van het bovenste een derde deel van de schoorsteen. S is een dimensie loze grootheid genaamd: getal van Strouhal. De waarde van deze constante is (NEN-EN-1991-1-4, 2005): 0,18. De windsnelheid wordt gegeven in v.

Als de frequentie f uit vergelijking [2.1] overeenkomt met de eigenfrequentie van de schoorsteen $f_n$ ontstaat er resonantie. De eigenfrequentie van een schoorsteen kan worden bepaald met (NEN-EN-1991-1-4, 2005):

$$f_n = 0{,}492 * \sqrt{\frac{t_w^3 * E}{\mu_s * (1-\tilde{v}^2) * b^4}} \qquad [2.2]$$

De windsnelheid waarbij de frequentie waarmee de wervels loslaten [2.1] samenvalt met de eigenfrequentie van de schoorsteen [2.2] noemt men de kritieke windsnelheid. Vergelijking [2.1] kan worden omgeschreven om de kritieke windsnelheid te bepalen:

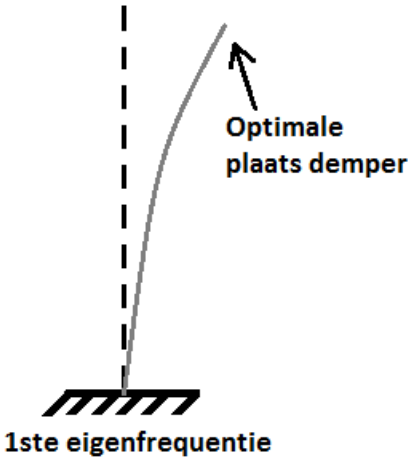
$$v_c = \frac{b * f_n}{S} \qquad [2.3]$$

Er dient te worden voorkomen dat eigenfrequentie van de schoorsteen en de loslaatfrequentie van de wervels samenvallen. Hierbij kan gebruik worden gemaakt van een trillingdemper.

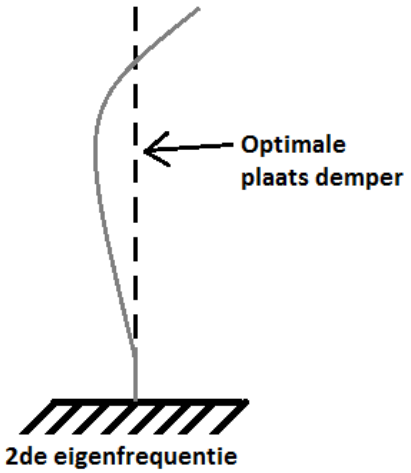
### 2.1.2 Doel van een trillingdemper

Trillingen zorgen voor wisselspanningen in het materiaal die vermoeiingsverschijnselen tot gevolg hebben. Dit is niet toelaatbaar. Het doel van een trillingdemper is het beperken van de overdracht van trillingsenergie van de bron naar de constructie. Doordat een demper een kracht uitoefent in tegengestelde richting ten opzichte van de bron wordt een deel van de trillingsenergie omgezet in warmte. Als de demper goed ontworpen is zal de trilling uitdempen. Op deze manier kunnen de vermoeiingsverschijnselen worden beperkt.

Figuren 2.2 en 2.3 tonen respectievelijk de 1$^{ste}$ en 2$^{de}$ eigenfrequentie van een schoorsteen. De demper moet worden geïnstalleerd op de plek waar de uitwijking het grootst is. Figuur 2.4 toont een demper die bovenin de schoorsteen is gemonteerd. In tegenstelling tot veel andere constructies, of bijvoorbeeld ventilatoren, staat de schoorsteen dus niet op zijn dempers.




Figuur 2.2. Schoorsteen in de 1$^{ste}$ eigenfrequentie.

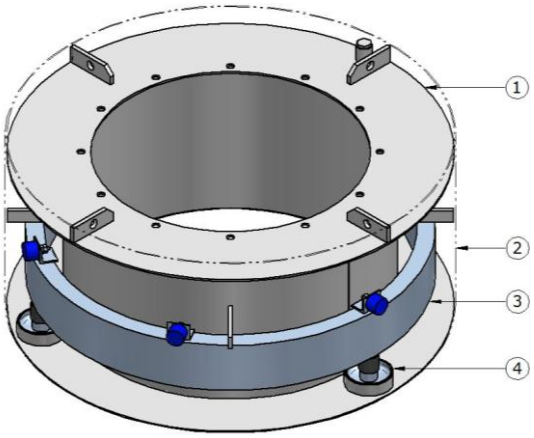



Figuur 2.3. Schoorsteen in de 2$^{de}$ eigenfrequentie.

Figuur 2.4. Schoorsteen met in de top de trillingdemper. (BN, Schoorsteen met trillingsdemper)

### 2.1.3 Toegepaste trillingsdempers

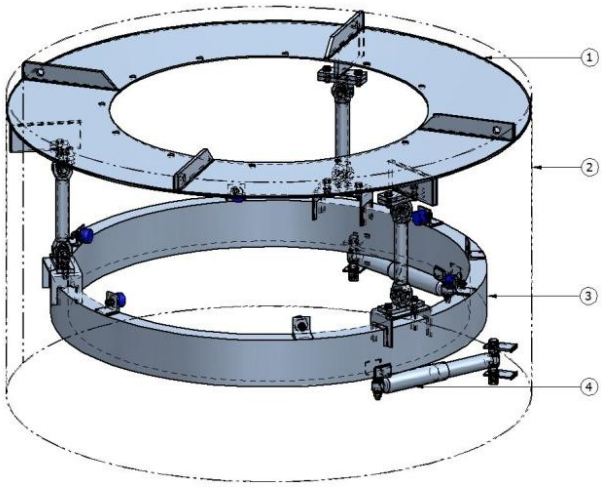
Op dit moment worden er twee soorten trillingsdempers regelmatig toegepast op schoorstenen door Bos Nieuwerkerk. Dit zijn de rol-ring-demper en de dynamische demper. De dempers worden met behulp van een flensverbinding bovenaan de mantel van de schoorsteen bevestigd. Beide dempers maken gebruik van een vrij bewegende massa. Bij de rol-ring-demper rolt deze massa heen en weer in kogelpotten. Figuur 2.5 toont een rol-ring-demper. Onderin zijn twee van de drie schalen ④ te zien. De licht blauwe ring ③ stelt de massa voor in het systeem. De bevestigingsflens en de dempermantel worden aangeduid met respectievelijk nummer ① en nummer ②.




Figuur 2.5. Computermodel van een rol-ring-demper. (BN, Rol ring demper)

De diameter van de schalen kan worden gevarieerd om zo de pendellengte aan te passen. De pendellengte wordt bij de rol-ring-demper bepaald door de diameter van de schalen. De massa rolt heen en weer met behulp van kogelpotten in deze schalen. Ook wordt de massa gespecificeerd per situatie.

Bij de dynamische demper, zoals weergegeven in figuur 2.6, hangt het gewicht met pendels aan de bovenplaat ①. De bovenplaat wordt met behulp van een flensverbinding aan de schoorsteen bevestigd. Hydraulische dempers ④ worden aan de dempermantel ② en het gewicht bevestigd ③.



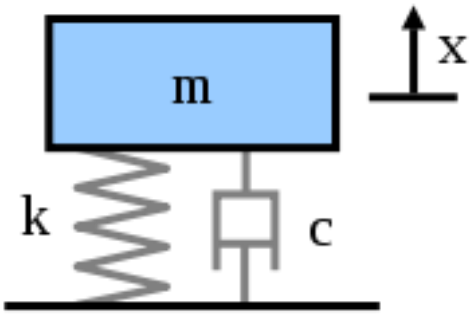

Figuur 2.6. Computermodel van een dynamische demper. (BN, Dynamische demper)

Bij deze dempers wordt de eigenfrequentie bepaald door de diameter van de schaaltjes of door de pendellengte.

### 2.1.4 Functioneren van een trillingdemper

Een schoorsteen kan worden gezien als een massa-veer-demper systeem. Omdat een trillende schoorsteen hetzelfde gedrag vertoont als een massa-veer-demper-systeem is het belangrijk om de theoretische achtergrond hiervan te begrijpen. In de komende paragraaf zal het wiskundig model van een massa-veer-demper-systeem worden behandeld.

De naam massa-veer-demper-systeem verteld ons al veel over de situatie. Het gaat om een massa die 'm' wordt genoemd. Deze massa is met behulp van veer, constante 'k', en een demper, constante 'c', verbonden met de wereld. De verplaatsing die deze massa ondergaat wordt 'x' genoemd. In figuur 2.7 is een schematische weergave te zien van deze situatie.




Figuur 2.7. Massa-veer-demper-systeem.

Met behulp van figuur 2.5 kan er een krachtenbalans worden opgesteld. De krachtenbalans van een massa-veer-demper-systeem wordt behandeld door de heer Koten in zijn publicatie over de demping van constructies. De krachtenbalans wordt gegeven door de volgende vergelijking (Koten, 1977):

$$m\frac{d^2x}{dt^2} + c\frac{dx}{dt} + kx = 0 \qquad [2.4]$$

Het uitwerken van de vergelijking uit [2.4] geeft als oplossing de onderstaande vergelijking (Koten, 1977):

$$x = a_1 e^{\alpha_1 t} + a_2 e^{\alpha_2 t} \qquad [2.5]$$

Met als waardes voor $\alpha_1$ en $\alpha_2$ (Koten, 1977):

$$\alpha_1 = \frac{1}{2m}\left(-c + \sqrt{c^2 - 4km}\right) \qquad [2.6]$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{2m}\left(-c - \sqrt{c^2 - 4km}\right) \qquad [2.7]$$

In de formules [2.6] en [2.7] komen de constante waardes voor de massa, de veer en de demping weer voor. Als de demper 'c' in het systeem een hele kleine waarde heeft wordt het stuk onder het wortelteken nul. De oplossing van vergelijking [2.5] wordt gegeven door (Koten, 1977):

$$x = x_1 e^{-\frac{c}{2m}t} \sin \omega_0 t + x_2 e^{-\frac{c}{2m}t} \cos \omega_0 t \qquad [2.8]$$

In vergelijking [2.8] is de constante '$\omega_0$' de hoekfrequentie waarbij resonantie optreedt. Deze constante kan worden geschreven als (Koten, 1977):

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m} - \frac{c^2}{4m^2}} \approx \sqrt{\frac{k}{m}} \qquad [2.9]$$

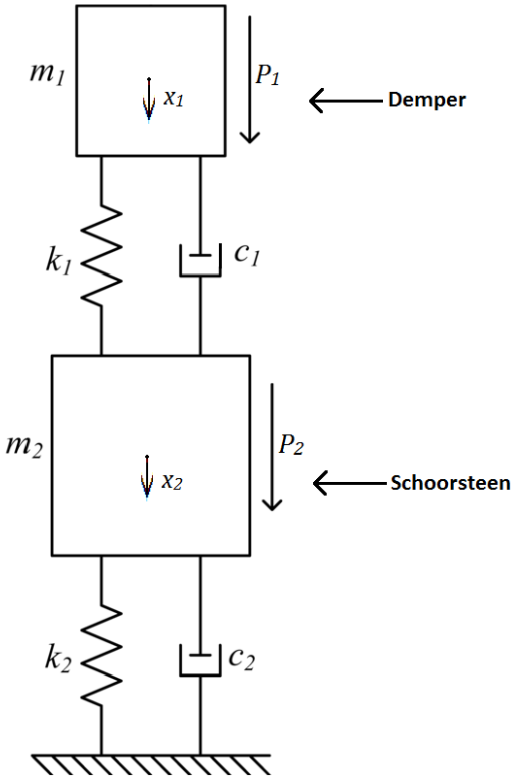
Het verband tussen de hoekfrequentie bij resonantie en de eigenfrequentie wordt gegeven door vergelijking [2.10]. De eigenfrequentie wordt verkregen door de hoekfrequentie te delen door tweemaal $\pi$:

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} \qquad [2.10]$$

### 2.1.5 Functioneren van een demper op een schoorsteen

In deze paragraaf wordt de trillingsleer achter een schoorsteen met trillingdemper beschouwd. Deze situatie wordt vereenvoudigd door de elementen als twee gecombineerde massa-veer-demper-systemen te beschouwen.

In de werkelijkheid werken de schoorsteen en de trillingdemper als een gecombineerd systeem. In figuur 2.8 wordt een schematische weergave getoond van dit gecombineerde systeem.




Figuur 2.8. Schematische weergave van twee gecombineerde massa-veer-demper-systemen.

De kracht op het eerste systeem ($P_1$) en op de het tweede systeem ($P_2$) worden gegeven door de bewegingsvergelijkingen [2.11] en [2.12]. Deze vergelijkingen houden rekening met de interactie tussen de twee systemen en worden gegeven door (Koten, 1977):

$$P_1 = m_1 \frac{d^2x_1}{dt^2} + c_1\left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_2}{dt}\right) + k_1(x_1 - x_2) \qquad [2.11]$$

En:

$$P_2 = m_2 \frac{d^2x_1}{dt^2} - c_1\left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_2}{dt}\right) + c_2\frac{dx_2}{dt} - k_1(x_1 - x_2) + k_2x_2 \qquad [2.12]$$

Met behulp van substitutie kunnen de amplitudes $x_1$ en $x_2$ worden berekend:

$$x_1 = \overline{x_1}e^{i\omega t} \qquad [2.13]$$

$$x_2 = \overline{x_2}e^{i\omega t} \qquad [2.14]$$

$$P_1 = \overline{P_1}e^{i\omega t} \qquad [2.15]$$

$$P_2 = \overline{P_2}e^{i\omega t} \qquad [2.16]$$

Na enig omschrijven en herschikking kunnen de volgende vergelijkingen worden opgesteld (Koten, 1977):

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

[2.17]

$$|x_2|^2 = \frac{\{P_1k_1 + P_2(-m_1\omega^2 + k_1)\}^2 + \{P_1c_1\omega + P_2c_1\omega\}^2}{\{(-m_1\omega^2 + k_1)(-m_2\omega^2 + k_1 + k_2) - k_1^2 - c_1c_2\omega^2\}^2 + \{c_1\omega(-m_2\omega^2 - k_1 + k_2) + (c_1 + c_2)\omega(-m_1\omega^2 + k_1)\}^2}$$

[2.18]

## 2.2 Logaritmisch decrement

Het logaritmisch decrement is een dimensieloze uitdrukking voor demping. In deze paragraaf wordt dieper ingegaan op de theorie achter demping en specifiek het logaritmisch decrement.

De demping wordt beschreven met behulp van constante 'c', de dempingconstante. Deze constante komt voor in de bepaling van het logaritmisch decrement. Het logaritmisch decrement, λ, beschrijft de logaritmische afname (decrement) tussen twee opeenvolgende uitwijkingen. Deze wordt beschreven in de onderstaande vergelijking (Koten, 1977):

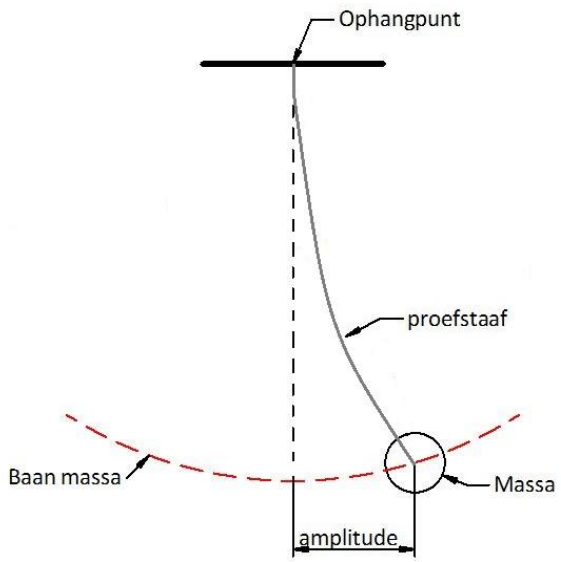
$$\lambda = \frac{\pi c}{m\omega_0} = \ln \frac{a_n}{a_{n+1}} \qquad [2.19]$$

Uit vergelijking [2.19] kan de dempingconstante 'c' worden afgeleid. Deze constante kan worden bepaald met onderstaande vergelijking (Koten, 1977):

$$c = \frac{m\omega_0}{\pi} \ln \frac{a_n}{a_{n+1}} \qquad [2.20]$$

## 2.3 Uitwijking een cantilever

Er moet worden voorkomen dat de proefstaaf plastisch vervormd bij het geven van de uitwijking. Om dit voor te zijn moet worden vastgesteld wat de maximaal toelaatbare uitwijking is aan de onderkant van de proefstaaf. De methode om de maximale uitwijking te bepalen zal hier worden besproken. Figuur 2.9 toont een vereenvoudigde weergave van de proef. De maximale uitwijking komt in figuur 2.9 overeen met de amplitude.




Figuur 2.9. Situatieschets van de cantilever.

De vloeispanning is een materiaaleigenschap die invloed heeft op het elastisch of plastisch vervormen van de proefstaaf. In de proef is gebruik gemaakt van staal type S235. Om te voorkomen dat de proefstaaf per ongeluk plastisch wordt vervormd is er gebruik gemaakt van een veiligheidsmarge van 15%. Dit betekent dat vloeigrens 15% lager is gekozen dan theoretisch mogelijk is. De vloeigrens van staal S235 is 235 MPa. Bij het berekenen van de maximale uitwijking is dan ook gerekend met een vloeigrens van 200 MPa.

De vloeispanning van een materiaal kan ook worden berekend door het moment M te delen door het weerstandsmoment W zoals in vergelijking [2.21] (Hibbeler, Mechanics of Materials, 2008):

$$\sigma_{vloei} = \frac{M}{W} \qquad [2.21]$$

Het weerstandsmoment, genoemd in vergelijking [2.21], voor een cirkel met diameter ‘d’ wordt gegeven door de vergelijking [2.22] (Hibbeler, Mechanics of Materials, 2008):

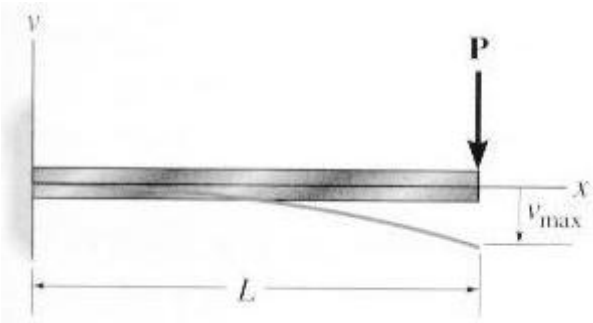
$$W = \frac{\pi d^3}{32} \qquad [2.22]$$

Met behulp van vergelijkingen [2.21] en [2.22] kan het moment aan de onderkant, ten opzichte van de inklemming, van de proefstaaf worden bepaald. Het moment wordt verkregen door de vloeispanning te vermenigvuldigen met het weerstandsmoment. Om de kracht ‘F’ haaks op de proefstaaf te bepalen moet het moment over de staaf worden gedeeld door de lengte.

Voor de laatste stap van het berekenen van de uitwijking kan gebruik worden gemaakt van vergelijking [2.23] (Hibbeler, Mechanics of Materials, 2008):

$$v_{max} = \frac{PL^3}{3EI} \qquad [2.23]$$

Voor de toepassing in de experimenten wordt $v_{max}$ in vergelijking [2.23] gegeven in millimeters. In bijlage VI staat een tabel met de berekende waardes. In figuur 2.10 is een schets te zien uit de sterkteleer van Hibbeler. Vergelijking [2.23] hoort bij deze situatie.



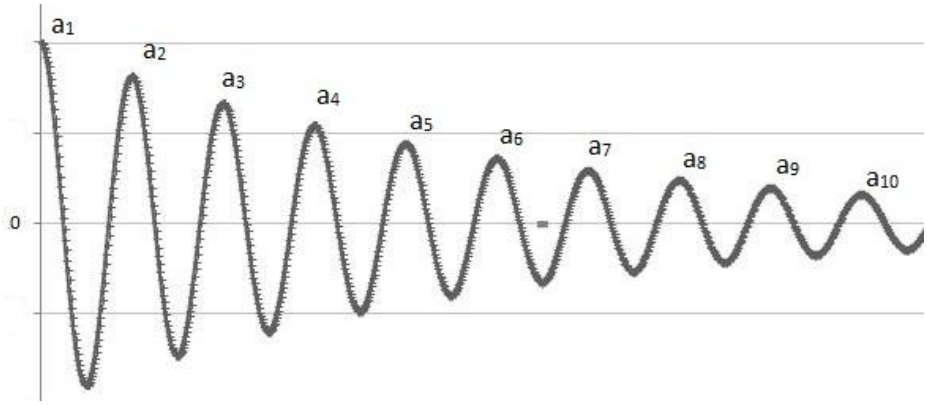

**Figuur 2.10. Ingeklemde balk. (Hibbeler, Mechanics of Materials, 2008)**

## 2.4 Bepaling amplitude verhouding

Belangrijk voor het bepalen van de demping is de amplitude verhouding. In paragraaf 2.2 wordt gesproken over de logaritmische afname van de amplitude met behulp van vergelijking [2.19]. Deze afname staat in verband met de amplitude verhouding. Dit verband wordt gegeven door (Koten, 1977):

$$\frac{a_2}{a_1} = e^{-2\pi\frac{c}{c_{cr}}} = e^{-\lambda} \qquad [2.24]$$

In figuur 2.11 is een gedempte trilling te zien. De amplitude neemt geleidelijk af. De amplitude $a_1$ is de beginwaarde. Vanaf dat punt wordt de massa losgelaten en start de trilling.




Figuur 2.11. Afname van de amplitude.

Om meer te weten te komen over de amplitude verhouding moet vergelijking [2.24] worden herschreven. Dit geeft een uitdrukking voor $a_2$:

$$a_2 = a_1 * e^{-2\pi\frac{c}{c_{cr}}} \qquad [2.25]$$

Vervolgens kan na twee trillingen $a_3$ worden bepaald:

$$\frac{a_3}{a_2} = e^{-2\pi\frac{c}{c_{cr}}} \qquad [2.26]$$

Als de vergelijking [2.25] wordt ingevuld bij [2.26] levert dat het volgende:

$$\frac{a_3}{a_1 * e^{-2\pi\frac{c}{c_{cr}}}} = e^{-2\pi\frac{c}{c_{cr}}} \qquad [2.27]$$

Herschrijven van vergelijking [2.27] levert een nieuwe uitdrukking:

$$\frac{a_3}{a_1} = \left(e^{-2\pi\frac{c}{c_{cr}}}\right)^2 \qquad [2.28]$$

Om een goed beeld te krijgen van de amplitude verhouding wordt hij bepaald over tien trillingen. Als op dezelfde manier wordt doorgerekend zoals getoond in formules [2.25] tot en met [2.28] kan de verhouding worden berekend over tien trillingen. Deze verhouding wordt gegeven door:

$$\frac{a_{11}}{a_1} = \left(e^{-2\pi\frac{c}{c_{cr}}}\right)^{10} \qquad [2.29]$$

## 2.5 Bepaling eigenfrequentie van de proef

Bij het selecteren van de proefstaaf is de eigenfrequentie van de staaf met aan het eind een massa erg belangrijk. De eigenfrequentie moet namelijk binnen in de buurt komen van de eigenfrequentie van de schoorsteen. De eigenfrequentie van een schoorsteen ligt vaak rond de een tot drie hertz. Een eis aan de proef is dus dat de staaf in combinatie met een bepaald gewicht een eigenfrequentie heeft tussen de een en de drie hertz.

Om deze frequentie te bepalen moet eerst de veerconstante worden bepaald van de proefstaaf. De veerconstante wordt gegeven door constante 'k'.

De vergelijking voor veerconstante k kan worden verkregen door het herschrijven van vergelijking [2.23]:

$$\frac{P}{v_{max}} = \frac{3*E*I}{L^3} = \mathrm{k} \qquad [2.30]$$

Voor de constante I, het oppervlaktetraagheidsmoment, geldt voor een massieve staaf (Hibbeler, Mechanics of Materials, 2008):

$$I = \frac{\pi*r^4}{4} \qquad [2.31]$$

Met behulp van vergelijking [2.30] kan de eigenfrequentie van een staaf met aan het uiteinde een massa worden bepaald door (Koten, 1977):

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \qquad [2.32]$$

Regelmatig wordt er gebruikgemaakt van de term hoekfrequentie. Om de frequentie in hertz om te rekenen naar de hoekfrequentie in radialen per seconde moet deze worden vermenigvuldigd met twee Pi. Vergelijking [2.33] geeft deze omrekening:

$$\omega = 2\pi f \qquad [2.33]$$

Andersom kan ook de frequentie uit de hoekfrequentie worden berekend door de hoekfrequentie te delen door twee Pi. Dit verband werd eerder gegeven in vergelijking [2.10].

## 2.6 Werkwijze voor het bepalen van de demping

Om de toepasbaarheid van het voorgestelde demperconcept te bepalen moet het logaritmisch decrement worden bepaald. Het logaritmisch decrement is een manier voor het kwantificeren van de demping. Dit moet gebeuren voor zowel een ingeklemde staaf, als voor een toepassing die gebruikmaakt van rubber. Om het logaritmisch decrement te bepalen dienen de uitwijkingen te worden opgemeten. Tot dit doel zal een proefopstelling worden ontworpen en gebouwd. Met behulp van de proefopstelling kan op een gecontroleerde manier de beweging van de massa worden bestudeerd. Deze proefopstelling moet geschikt zijn om demping toepassingen zonder en met rubber te analyseren. De proefopstelling zal met behulp van de methodisch ontwerpen worden ontwikkeld. Naderhand zullen de meetgegevens worden verwerkt en geanalyseerd.

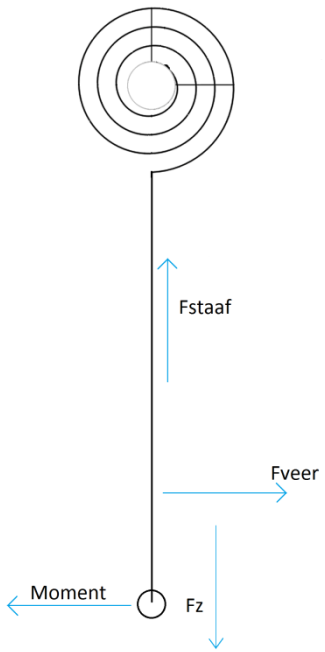
**Aanpak en doel:**

| | |
|---|---|
| Proefstelling | Om de beweging van de massa te meten. Met de meetgegevens kan de demping worden berekend. |
| Methodisch ontwerpen | De proefopstelling moet aan verschillende eisen voldoen. Met methodisch ontwerpen wordt er op een gestructureerde manier een ontwerp ontwikkeld. |
| Verwerken meetgegevens | Met behulp van de ruwe meetgegevens moet de dempende waarde worden berekend. Om dit op een overzichtelijke manier te doen zal er gebruik worden gemaakt van een datasheet. |

# 3. Analyse de cantilever

## 3.1 Een massa-interne-wrijving-systeem

Het te onderzoeken demperontwerp heeft veel overeenkomsten met een massa-veer-demper-systeem. Het concept moet niet worden verward met een slinger. In de deze situatie gaat het namelijk om een cantilever. Door de inklemming wordt de beweging van de massa bepaald door de buiging van de staaf. In dit ontwerp is ontbreekt een duidelijke onderscheid tussen de veer en de demper. De ingeklemde staaf vormt namelijk de veer en door de interne wrijving ook de demper. Op deze dempende werking zal in paragraaf 3.2 dieper worden in gegaan.




Figuur 3.1. Krachten analyse cantilever.

Figuur 3.1 toont de projectie van de krachten die werken op de massa. De werking van de inklemming wordt hier weergegeven als een spiraalveer. Op de massa werkt de zwaartekracht $F_z$. De massa wordt op zijn plaats gehouden door de normaalkracht $F_s$ (staaf). Doordat de staaf is ingeklemd werkt deze situatie niet als een reguliere slinger. Door een combinatie van de zwaartekracht en de interne krachten van de staaf wordt de massa weer naar zijn oorspronkelijke positie teruggebracht. Dit gebeurd door de veerkracht. In paragraaf 3.2 worden deze krachten verklaard.

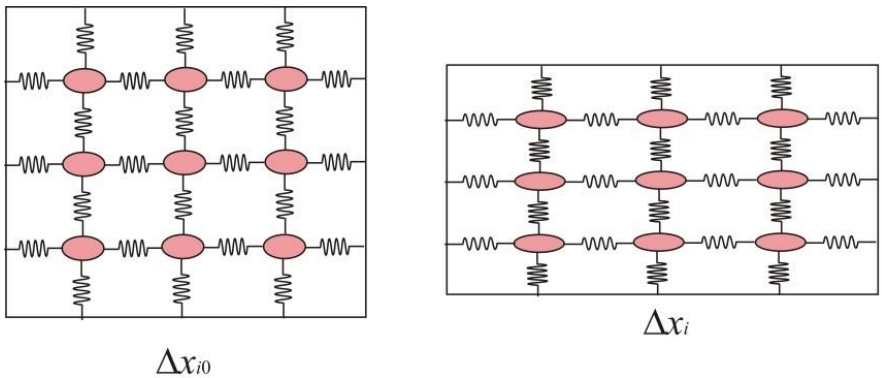
## 3.2 Energieomzetting bij vervorming van materialen

Er zijn veel verschillende vormen van energie: mechanisch, chemisch, nucleair, elektrisch, magnetisch, straling, enzovoorts. Deze vormen kunnen worden ingedeeld in twee verschillende groepen: kinetische energie (door beweging) en potentiële energie (opgeslagen energie, energie dat materie heeft door zijn positie of door de schikking van onderdelen).

De focus ligt bij dit onderzoek op omzetting van kinetische naar potentiële energie en visa versa tijdens het vervormen van staal en rubber. Om de verandering van energie door het vervormen van een materiaal uit te leggen volgt hieronder een voorbeeld aan de hand van een stuiterbal.

**De stuiterbal**

Als een stuiterbal op een bepaalde hoogte boven de grond wordt gehouden heeft hij potentiële energie door de zwaartekracht. Als we deze stuiterbal laten vallen wordt deze energie geleidelijk omgezet in kinetische energie terwijl zijn snelheid toeneemt tot het moment dat hij de grond raakt. Dan is alle energie omgezet in kinetische energie. Doordat de bal de grond raakt begint hij, elastisch, te vervormen. Dit leidt ertoe dat de kinetische energie wordt omgezet in elastische spanningsenergie. Deze wordt als het ware opgeslagen in de bal. Het vervormen van de bal en het opbouwen van de spanningsenergie kan worden gezien als het indrukken van een veer. Zie Figuur 3.2, dit is een visueel model van dit idee. Als de bal maximaal is vervormd, of wel de veer is maximaal ingedrukt, is alle kinetische energie omzet in spanningsenergie. Vervolgens wordt deze spanningsenergie weer terug gevormd naar kinetische energie en “duwt” het de bal weer van de grond.




Figuur 3.2. Schematische weergave van de verende werking in de stuiterbal. (Miroslav Holeček)

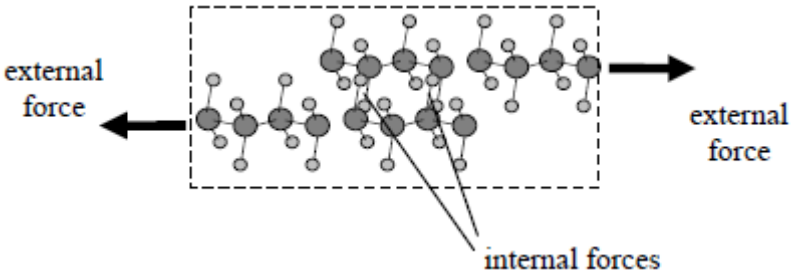
De elastische spanningsenergie is hier een vorm van potentiële energie. De elastische vervorming kan vergeleken worden met het optillen van een massa, in beide gevallen neemt de potentiële energie toe.

In theorie zijn de energie overdrachten zoals in het voorbeeld hierboven allemaal volledig zonder verlies. In de praktijk is dit echter niet het geval. Door interne wrijvingen treed er energie verlies op. Een goed voorbeeld hiervan is een squashbal, deze wordt steeds warmer naarmate er tegenaan wordt geslagen. De energie wordt dus niet volledig terug om gezet naar kinetische energie maar komt vrij in de vorm van warmte. In de volgende paragraaf wordt dieper ingegaan op energie verlies door interne wrijvingen.

### 3.2.1 Hysteresis bij vervorming

In deze paragraaf wordt de mate van energieverlies besproken door interne wrijving van de moleculen in staal. Verondersteld wordt dat de spanning die het materiaal ondervindt binnen het elastische gebied blijft.

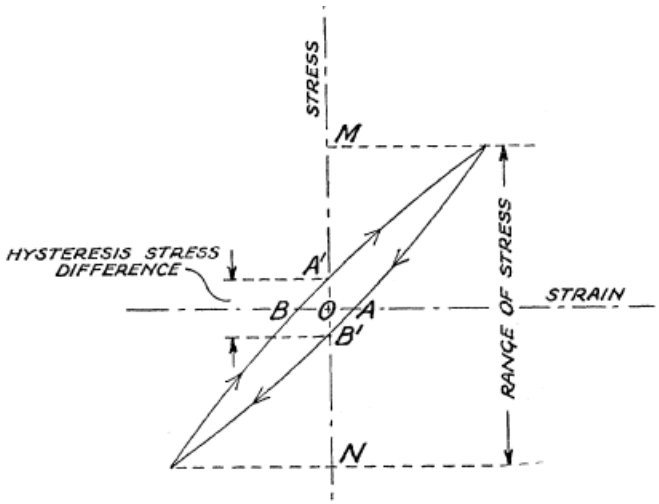
De dempende werking van materialen door interne moleculaire wrijving wordt hysteresis genoemd. In figuur 3.3 is een visuele representatie te zien van deze wrijving. Als er kracht op een materiaal wordt uitgeoefend vervormd het. In het algemeen kan bij staal onderscheid worden gemaakt tussen elastische vervorming en plastische vervorming. Bij elastische vervorming keert het materiaal terug naar zijn oorspronkelijke vorm, het is dus een tijdelijke vervorming. Bij plastische vervorming is de verandering echter zo groot dat het materiaal permanent vervormd zal blijven.




Figuur 3.3. Visuele weergave van de interne wrijving. (Kelly)

Onder normale omstandigheden waarbij de last met constante stappen wordt aangebracht zijn de spanning- en rekcurve lineair afhankelijk van elkaar. Maar, onder een cyclische last houdt deze lineaire afhankelijkheid maar even stand. Doordat er plastische microvervormingen ontstaan gaat het materiaal zich visco elastisch gedragen (zie paragraaf 3.2.2). Dit heeft als gevolg dat de spanning- en rekcurve niet meer lineair afhankelijk van elkaar zijn en zo ontstaat er een hysteresis lus. In de volgende paragraaf zal visco elasticiteit nader worden uitgelegd.

Het spanning-rekdiagram dat ontstaat bij het uitrekken en samendrukken van een test staaf heeft de vorm van een zeer smalle lus. In de publicatie 'Elastic Hysteresis in Steel' wordt de vorm van de lus beschreven als: "lensvormig en ingesloten door twee cirkels met een grote radius."




Figuur 3.4. De hysteresis lus. (Hopkinson)

Een theoretisch model van een hysteresis lus is te zien in Figuur 3.4. Het oppervlakte binnen de lus komt overeen met het energieverlies. Het verkrijgen van deze grafiek vereist echter professionele apparatuur en zal daarom ook geen onderdeel zijn van dit rapport. In paragraaf 3.2.2 zal dieper worden ingegaan op de eerdergenoemde visco elasticiteit.

### 3.2.2 Visco elasticiteit

In de paragraaf 3.2.1 over hysteresis is de term visco elastisch gedrag gevallen. Hier zal uiteen worden gezet wat het verband is tussen visco elasticiteit en dempers.

Demping door hysteresis komt overeen met de werking van visco elastische dempers, in beide gevallen wordt energie omgezet in warmte. Een visco elastisch materiaal vertoont eigenschappen die zowel visceuse als elastische kenmerken hebben als het een vervorming ondergaat. Hierdoor zijn ze geschikt voor het toepassen in dempers.

Rubber is veel toegepast visco elastisch materiaal in trillingsdempers. In dit onderzoek wordt rubber dan ook gebruikt voor deze toepassing.

**Demper**

Visco elastische dempers zijn onderdelen die geen last dragen en zo zijn ontworpen dat ze mechanische energie van de bewegende constructie omzetten in warmte. Dit leidt op zijn beurt tot reductie van de amplitude, en zo van de trillingsbeweging. Het materiaal waarin de overdracht van mechanische energie naar warmte-energie plaats vindt noemt men in deze dempers: visco elastisch. Visco elastische dempers kunnen goed worden toegepast in situaties waar hoge demping is vereist en de frequentie laag is. De mechanische eigenschappen van visco elastische materialen zijn echter vrij complex omdat ze ook kunnen variëren met de omgevingstemperatuur en de trillingsfrequentie.

**Theorie**

Om inzicht te krijgen in de eigenschappen van visco elastisch materiaal worden hier enkele formules afgeleid die informatie geven over de rek en spanning. De spanning en rek staan met elkaar in verband doormiddel van de elasticiteitsmodulus E.

De elasticiteitsmodulus wordt gegeven door (Hibbeler, Mechanics of Materials, 2008):

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \qquad [3.1]$$

Als de spanning die een visco elastisch materiaal ondergaat een sinus last is, een trilling, dan komt deze verhoudingsgewijs overeen met de rek en faseverschil δ. Voor perfect elastisch materiaal zijn de spanning en rek in fase met elkaar en is het faseverschil δ = 0. Terwijl bij een ideaal visceus materiaal de spanning en rek 90° uit fase zijn. Dus δ = 90°. Een visco elastisch materiaal is een combinatie van deze twee.

Rekening houdend met de trilling kan de rek worden afgeleidt uit formule [3.1]. De rek kan dan worden geschreven als (Meyers, 2009):

$$\epsilon = \epsilon_0 \sin \omega t \qquad [3.2]$$

De spanning kan worden berekende met (Meyers, 2009):

$$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t + \delta) \qquad [3.3]$$

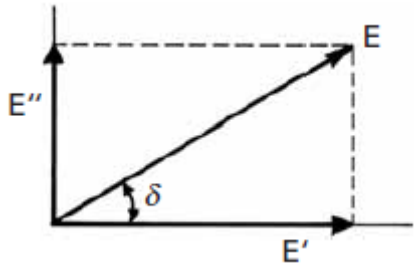
In de formule voor spanning is δ dus het faseverschil tussen de spanning en de rek. Met de vergelijkingen uit [3.1], [3.2] en [3.3] kunnen nu uitdrukkingen worden geformuleerd voor de trek opslagmodulus (E') en de trek verliesmodulus (E'') (Meyers, 2009):

$$E' = \left(\frac{\sigma_0}{\epsilon_0}\right) \cos \delta \qquad [3.4]$$

en

$$E'' = \left(\frac{\sigma_0}{\epsilon_0}\right) \sin \delta \qquad [3.5]$$

In figuur 3.5 wordt het verband tussen deze twee grootheden weergegeven.




**Figuur 3.5. Het verband tussen de trek opslag en het trek verlies. (Meyers, 2009)**

Met behulp van de formule van Euler[1] kunnen vergelijkingen [3.2] en [3.3] ook anders worden schreven (Meyers, 2009):

$$\epsilon = \epsilon_0 e^{i(\omega t)} \qquad [3.6]$$

En:

$$\sigma = \sigma_0 e^{i(\omega t + \delta)} \qquad [3.7]$$

De modulus E kan ook worden geschreven als (Meyers, 2009):

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} e^{i\delta} = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0}(\cos\delta + i\sin\delta) \qquad [3.8]$$

$$E = E' + iE'' \qquad [3.9]$$

Met *i* als het imaginaire getal $\sqrt{-1}$. De afschuifmodulus kan op dezelfde manier worden afgeleid als de trekmodulus hierboven. Dit heeft als gevolg dat de complexe afschuifmodulus kan worden geformuleerd door:

$$G = G' + iG'' \qquad [3.10]$$

Hier is G' de afschuif opslagmodulus en G'' de afschuif verliesmodulus. De opslagmodulus geeft de opgeslagen energie, dit komt in feite neer op het elastische deel. De verliesmodulus geeft daarin tegen informatie over de energie die verloren gaat in de vorm van warmte. Met andere woorden, het visceuse deel.

De twee moduli kunnen worden omgeschreven naar de vorm van de fase verandering (Meyers, 2009):

$$G'' = G\sin\delta \quad (3.11), \quad E'' = E\sin\delta \quad [3.12],$$

$$G' = G\cos\delta \quad (3.13), \quad E' = E\cos\delta \quad [3.14].$$

Nu deze definities bekend zijn kan de term genaamd 'verlies tangent' worden geformuleerd (Meyers, 2009):

$$Verlies\ tangent = \tan\delta = \frac{energie\ verlies}{energie\ opgeslagen} = \frac{G''}{G'} = \frac{E''}{E'} \qquad [3.15]$$

Voor het bepalen van de geschikte demper is het heel belangrijk om te weten wat het logaritmisch decrement is. Hierbij wordt gebruik gemaakt van het amplitude verschil tussen twee op een volgende trillingen. Het logaritmisch decrement is het natuurlijk logaritme tussen twee op een volgende trillingen. Dit wordt gedefinieerd door (Koten, 1977):

$$\lambda = \ln\frac{a_n}{a_{n+1}} \qquad [3.16]$$

[1]: $e^{\pm i\theta} = \cos\theta \pm i\sin\theta$

De formules [3.15] en [3.16] kunnen worden gebruikt om deze te definiëren (Meyers, 2009):

$$Logaritmisch\ decrement\ \lambda\ =\ 2\pi \tan\delta = \frac{2\pi E''}{E'} \qquad [3.17]$$

Zowel de verlies tangent als het logaritmisch decrement staan in verhouding met het maximale energieverlies en de maximale energie opslag per cyclus.

**Aantekening**

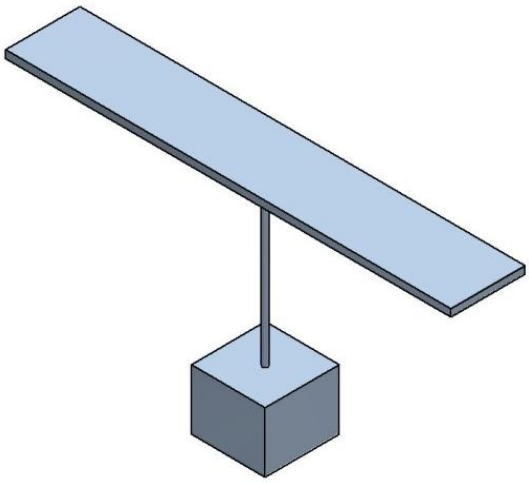
Het probleem bij het berekenen van de materiaaldemping volgens de hierboven besproken methode is het bepalen van het faseverschil δ. Dit faseverschil is van verschillende factoren afhankelijk zoals de materiaalsamenstelling en de temperatuur. Door dat dit faseverschil niet kan worden bepaald kan ook de dempingwaarde, het logaritmisch decrement, niet van te voren worden berekend.

Omdat er geen dempingwaarde kan worden berekend is er ook geen gebruik gemaakt van het programma Simulink om een dempermodel te maken. Simulink is dan ook niet gebruikt om een voorspellend model te maken voor de materiaaldemping.

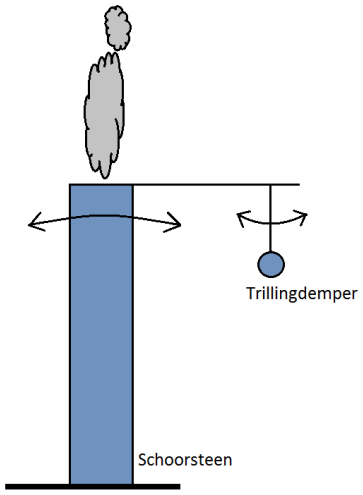
# 4. De proefopstelling

De proefopstelling heeft als doel de waarde van materiaaldemping te bepalen van een metalen staaf. Daarnaast moeten alternatieven manieren van demping die ook zijn gebaseerd op interne wrijving in hetzelfde frame kunnen worden getest. Om de demping te bepalen zal het logaritmisch decrement moeten worden berekend. Voor het berekenen van het logaritmisch decrement moeten de amplitudes van de trillingen als functie van de tijd worden bepaald. Het bepalen van het logaritmisch decrement kan worden opgesplitst in twee deelfuncties. De eerste deelfunctie is het bewegen van de massa, de tweede deelfunctie is het analyseren van de slingerbeweging. Het ontwerpen van de proefopstelling zal gebeuren volgens het principe van methodisch ontwerpen.

De beweging van de massa is te vergelijking met de massa die beweegt in de huidige dempers. Het analyseren van de beweging omschrijft alles wat nodig is om de amplitude van 10 opeenvolgende bewegingen van de massa te noteren. Bij aanvang van dit onderzoek is een principeschets gemaakt van de situatie. De schets wordt weergegeven in figuur 4.1. Met behulp van deze schets kunnen eventuele knelpunten eerder worden ingeschat. De proefopstelling moet een situatie nabootsen zoals geschetst in figuur 4.2.



Figuur 4.1. Principeschets proefopstelling.




Figuur 4.2. Situatie schets met de locatie van de demper.

De principeschets toont drie onderdelen. Een flens ter bevestiging, de proefstaaf en de massa.

Knelpunten uit de schets:

- De flens is een vlakke strip, deze kan makkelijk wringen. De constructie dient een hoge stijfheid te hebben.
- De massa, opgebouwd uit een blok is in deze situatie moeilijk te variëren.
- De meetuitslag is lastig te zien, er dient een manier te worden uitgewerkt om de amplitude goed te kunnen aflezen.

Nu er kennis is van de knelpunten kan er worden gestart met het methodisch ontwerpen. Er zijn meerdere manieren om amplitude te meten. Ook kan de stijfheid van de constructie op verschillende manieren worden gewaarborgd.

## 4.1 Methodisch ontwerpen voor proefopstelling

Het doel van de proef luid als volgt: *Een proefopstelling om demping door interne materiaalwrijving te meten. Zowel voor een ingeklemde staaf als voor een toepassing met rubber.*

Om het doel te bereiken is het van belang dat er voorwaarden worden gesteld aan het ontwerp.

| Functioneel | Fabricage | Voorwaarden | Vast | Variabel | Wens |
|---|---|---|---|---|---|
| | ✓ | 1. De proefopstelling moet door Bos Nieuwerkerk gefabriceerd kunnen worden | | ✓ | |
| | ✓ | 2. De proefopstelling moet economisch verantwoord worden uitgevoerd | | ✓ | |
| ✓ | | 3. Alle bewegingsvrijheden zijn uitgesloten behalve van de gewente onderdelen | ✓ | | |
| ✓ | | 4. Hoge stijfheid van de constructie | ✓ | | |
| ✓ | | 5. Metingen kunnen uitvoeren voor verschillende staaf diameters | ✓ | | |
| ✓ | | 6. Demping mbv rubber moet ook kunnen worden getest in hetzelfde frame | ✓ | | |
| ✓ | | 7. Nauwkeurige meetresultaten | | ✓ | |
| ✓ | | 8. Goed afleesbare meetresultaten | ✓ | | |
| ✓ | | 9. De massa aan de proefstaaf moet kunnen variëren | ✓ | | |

Tabel 1. Ontwerp voorwaarden.

Tabel 1 geeft de verschillende ontwerpvoorwaarden weer. Er wordt hier onderscheid gemaakt tussen functionele en fabricage voorwaarden. Ook wordt afgebakend of een voorwaarde vast, variabel of een wens is. Variabele voorwaarden moeten worden afgebakend, tabel 2 op de volgende pagina geeft hier duidelijkheid over. Aan de vaste voorwaarden moet absoluut worden voldaan.

Tabel 2 laat de toelichting zien bij de variabele voorwaarden. Ook wordt er een weegfactor toegekend aan deze variabelen.

| Voorwaarde | Toelichting | Weegfactor |
|---|---|---|
| 1. De proefopstelling moet door Bos Nieuwerkerk gefabriceerd kunnen worden | Er wordt rekening gehouden met de beschikbaarheid van de materialen. Als een onderdeel niet door Bos Nieuwerkerk gefabriceerd kan worden, dan wordt er gekeken naar externe partijen voor de levering van deze onderdelen. | 20% |
| 2. De proefopstelling moet economisch verantwoord worden uitgevoerd | Bij de keuze van de onderdelen dient er rekening te worden houden met de kosten. Buiten de kostprijs van materialen en onderdelen moet er ook worden gekeken naar de kosten van de arbeid. | 40% |
| 7. Nauwkeurige meetresultaten | De meetresultaten moeten met een nauwkeurigheid van ten minste 1 mm kunnen worden afgelezen. | 40% |

Tabel 2. Toelichting variabele ontwerpvoorwaarden.

Toelichting van de weegfactor: het binnenshuis produceren heeft de voorkeur, maar als het goedkoper is om een onderdeel in te kopen zal dit voorrang krijgen en vervalt de harde eis om het binnen Bos Nieuwerkerk te produceren. Het is zeer wenselijk om nauwkeurig meet resultaten te krijgen. Hierbij mogen de kosten alleen niet onbeperkt oplopen.

De doelstelling van de proef kan worden opgesplitst in drie deelfuncties.

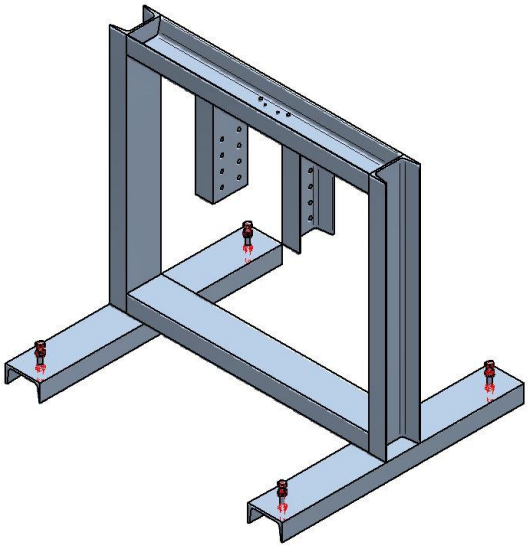
1. Het meten van de amplitude
2. Het variëren van de massa
3. Het schakelen tussen een ingeklemde staaf en een toepassing met rubber.

Deelfunctie 1 moet dus ten minste voldoen aan voorwaarden 7 en 8. Daarnaast is het van belang dat er een balans wordt gevonden met voorwaarden 1 en 2.

De tabel met de eisen en wensen voor proefopstelling staat in bijlage V. Ook het morfologisch overzicht en de scoretabellen staan in deze bijlage.

## 4.2 Uiteindelijk ontwerp

De verschillende concepten zijn beoordeeld volgens de tabellen in bijlage VII. Concept C heeft de hoogste score behaald is uitgewerkt tot de testopstelling. Figuur 4.3 geeft het 3D model weer van de proefopstelling.



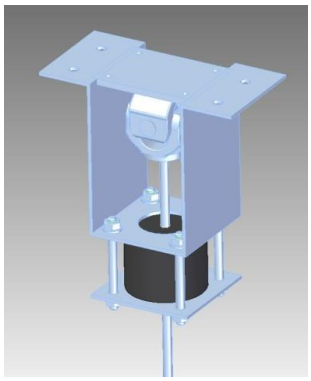
Figuur 4.3. Computermodel van het frame voor de proefopstelling.

Bij tijdens het uitwerken van concept zijn aanpassingen gedaan aan het ontwerp naarmate er meer kennis werd vergaard. Zo heeft de onderste of eerste plaat voor de massa drie draadeinden gekregen die met behulp van lasmoeren zijn bevestigd aan de schijf. Op deze manier hangen de schijven als een massief pakket aan de cantilever. Het ontwerp maakt gebruik van een laser pen die aan de zijkant van de massa wordt bevestigd. Op de onderste horizontale balk ligt een roos met maatverdeling. Door dat de rode stip op de roos schijnt kan de uitwijking duidelijk worden afgelezen. De trillingen zullen worden geregistreerd met de videocamera van een telefoon.

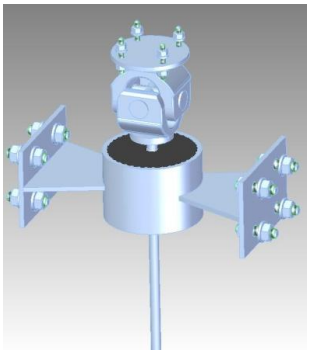
Figuur 4.4. Het uiteindelijke ontwerp.

**Rubber ophanging**

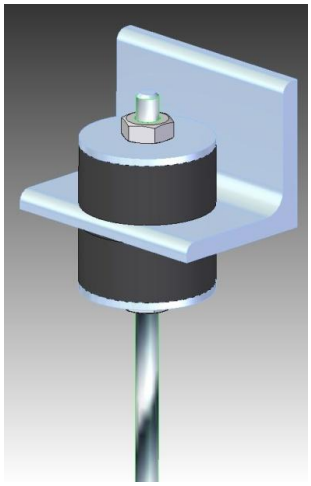
Voor de toepassing met rubber zijn drie verschillende concepten uitgewerkt. Concept 1 en 2 maken beide gebruik van een cardankoppeling. Op deze manier kan de pendel met de massa vrij bewegen. In concept 3 hangt de pendel als het ware in het rubber. Dit idee is gebaseerd op een ontwerp van trilling- dempingbedrijf Rubber Design. Het is dan ook een inkoop onderdeel. Op basis van overleg met dit bedrijf is er gekozen voor concept 3. De rubbers in dit concept hebben een hardheid van Shore A 40. In figuur 4.8 is een grafiek te zien met op de y-as de kracht in newton en op de x-as de vervorming in millimeter zal dit rubber een schuine lijn vertonen onder een hoek van 40° met de horizontale as.  In dit geval betekend dat dus dat er een kracht van 300 newton nodig is voor een vervorming van 1 millimeter.



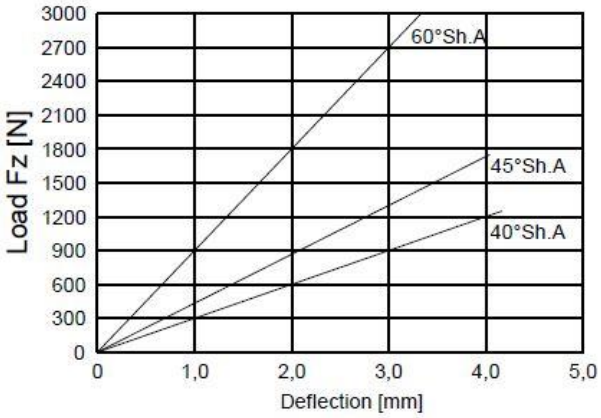
Figuur 4.5. Concept 1, vertikaal ingeklemd.



Figuur 4.6. Concept 2, horizontaal ingeklemd.



Figuur 4.7. Model van de ophanging met rubber.




Figuur 4.8. Grafiek met de kracht versus de vervorming .

# 5. Meetresultaten

In dit hoofdstuk worden de resultaten en bevindingen besproken die zijn verkregen met de proefopstelling uit hoofdstuk 4.

## 5.1 De meetmethode

De slingerbeweging is geregistreerd op film. Met behulp van software is het mogelijk om de film frame voor frame te analyseren. Op deze manier kan tot op de millimeter nauwkeurig de amplitude worden bepaald. Ook kan de trillingstijd tot op een honderdste seconde worden bepaald met behulp van de tijdsstempel bij elk frame.

De eerste reeks proeven is uitgevoerd op een massieve staaf met een diameter van 8mm. Het materiaal van deze staaf is staal S235. Tijdens de proef is het gewicht dat aan de proefstaaf hangt met stappen van 10 [kg] verhoogd. Op deze manier is er stapsgewijs opgebouwd van 10 [kg] naar 80 [kg].

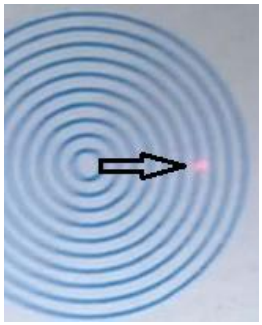
Het uitvoeren van de proef en de analyse van de gegevens gebeurt in een aantal stappen:

1. Het kaliberen van de meetroos. Bij aanvang van de proef moet de zicht in het midden van de roos bevinden. Figuur 5.1.
2. Een uitwijkingen geven aan de slinger. In dit geval is de uitwijking negen millimeter. De begintijd van de slinger beweging kan worden bepaald met de tijdsstempel van het beeld. Figuur 5.2.
3. Het volgen van de slinger beweging. Figuur 5.3.
4. Het noteren van de amplitude in zijn uiterste stand. Figuur 5.4.

Figuur 5.1. Kalibreren meetroos.

Figuur 5.2. Uitwijkingen geven.

Figuur 5.3. Slinger in beweging



Figuur 5.4. Slinger bijna in zijn uiterste stand.

Dit proces is vervolgens herhaald om de demping van de rubber ophanging te bepalen. Er is een apart datasheet gecreëerd om de gegevens te analyseren.

## 5.2 Gemiddelde demping van meerdere metingen

Omdat metingen onregelmatigheden kunnen vertonen zijn de proeven voor elke massa minimaal vijf keer uitgevoerd. Met de meetgegevens kan vervolgens het logaritmisch decrement en de eigenfrequentie worden berekend. De methode hiertoe is besproken in hoofdstuk 2. Daarnaast is er rekening gehouden met de meet onzekerheid. In de tabellen staat de standaarddeviatie achter de gemiddelde waarde. De methode voor het berekenen van de standaarddeviatie wordt behandeld in bijlage III. Omdat de steek proef relatief klein is de invloed van deze deviatie behoorlijk groot.

In tabel 1 zijn de berekende waardes te zien van de stalen staaf met een diameter van acht millimeter. Het is duidelijk te zien dat naarmate de massa toeneemt de eigenfrequentie van het systeem afneemt. Het logaritmisch decrement vertoont echter geen constant gedrag onder invloed van een veranderende massa. De waarde varieert tussen de 0.009 en 0.023, met een gemiddelde waarde van 0.014. Ter vergelijking, deze waarde is een factor 10 lager dan dat gebruikelijk is bij een rol-ring-demper.

| Massa [kg] | Logaritmisch decrement, λ | Eigenfrequentie [Hertz] |
|---|---|---|
| **10** | 0.023 ±0.006 | 1.74 ±0.01 |
| **20** | 0.017 ±0.004 | 1.38 ±0.01 |
| **30** | 0.012 ±0.004 | 1.23 ±0.01 |
| **40** | 0.016 ±0.005 | 1.14 ±0.01 |
| **50** | 0.010 ±0.003 | 1.09 ±0.00 |
| **60** | 0.015 ±0.003 | 1.05 ±0.01 |
| **70** | 0.009 ±0.002 | 1.02 ±0.00 |
| **80** | 0.012 ±0.005 | 1.00 ±0.01 |

**Tabel 1. Berekende demping en eigenfrequentie uit de metingen van Ø8mm staaf. Met de standaarddeviatie.**

De berekende waardes van de rubber ophanging worden weer gegeven in tabel 2. Ook hier neemt de eigenfrequentie af naarmate de massa toeneemt. Het berekende logaritmisch decrement, bij dezelfde massa, is groter dan bij proef één. De waarde neemt bij de eerste vier stappen af met de afnemende eigenfrequentie. Daarna lijkt de demping gelijk te blijven.

| Massa [kg] | Logaritmisch decrement, λ | Eigenfrequentie [Hertz] |
|---|---|---|
| **10** | 0.043 ±0.003 | 1.28 ±0.01 |
| **20** | 0.036 ±0.004 | 1.05 ±0.00 |
| **30** | 0.025 ±0.002 | 0.96 ±0.00 |
| **40** | 0.018 ±0.002 | 0.91 ±0.00 |
| **50** | 0.018 ±0.005 | 0.87 ±0.00 |
| **60** | 0.019 ±0.004 | 0.89 ±0.1 |
| **70** | 0.020 ±0.002 | 0.84 ±0.00 |

**Tabel 2. Berekende demping en eigenfrequentie uit de metingen met rubber. Met de standaarddeviatie.**

De lengte van de cantilever waarbij deze proeven zijn uitgevoerd bedraagt 445 millimeter. Gemeten vanaf de onderkant van de massa tot aan de onderkant van het eerste rubber.

**Variërende pendellengte**

Voor beide proeven geldt dat eigenfrequentie afneemt met een oplopende massa. Tijdens het uitvoeren van de proef met de rubber ophanging is de hypothese gevormd dat de demping toeneemt naarmate de eigenfrequentie toeneemt. De gedachtegang is dat door de hogere snelheid er meer energie wordt afgegeven aan het rubber. Om dit te testen is er een constante massa gekozen. Vervolgens is de pendellengte in stappen van 30 millimeter verkleind om de eigenfrequentie omhoog te laten gaan. In tabel 3 is het resultaat te zien van dit experiment. De massa bedroeg 30 kg.

| Pendellengte [mm] | Logaritmisch decrement, λ | Eigenfrequentie [Hertz] |
|---|---|---|
| **445** | 0.025 ±0.002 | 0.96 ±0.00 |
| **415** | 0.027 ±0.001 | 0.99 ±0.00 |
| **385** | 0.033 ±0.003 | 1.04 ±0.00 |
| **355** | 0.035 ±0.004 | 1.10 ±0.00 |
| **325** | 0.037 ±0.004 | 1.19 ±0.01 |

**Tabel 3. Berekende demping en eigen frequentie bij variërende pendellengte met rubber. Met de standaarddeviatie.**

De gegevens laten zien dat de gestelde hypothese in deze situatie geldt. Het logaritmisch decrement neemt toe naarmate de eigenfrequentie wordt verhoogd. Externe omstandigheden zoals omgevingstemperatuur zijn hier niet in acht genomen. Ook is niet bekend hoe de demping door het rubber zich houd als de trillingen een lange tijd aanhouden. Bijvoorbeeld als een aantal uur achterelkaar zou waaien en de schoorsteen langdurig beweegt.

## 5.3 De onderzoeksresultaten vergelijken

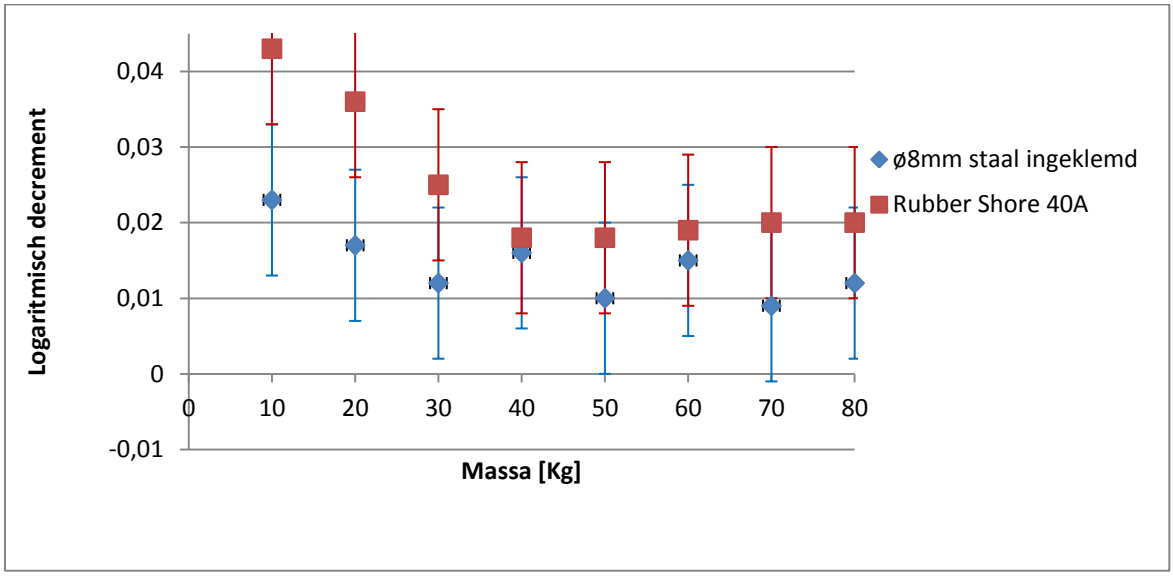
Zoals genoemd in paragraaf 5.2 is de dempende waarde van de ingeklemde staaf erg laag. Een logaritmisch decrement van 0.15 is heel schappelijk voor een rol-ring-demper. Bij proef één, de ingeklemde staaf, is een gemiddelde demping van 0.014 berekend. Dit is dus bijna een factor 10 lager. Interessante is dat deze waarde dicht in de buurt komt van door de NEN opgegeven waarde van materiaaldemping voor een schoorsteen. In NEN-norm, NEN-EN 1991-1-4 2005, staat in tabel F.2 een overzicht van de constructie demping uitgedrukt in het logaritmisch decrement. Bij het berekenen van een schoorsteen wordt gewerkt de waarde die bij een "unlined welded steel stacks without external thermal insulation" hoort. Deze waarde bedraagt in de norm (NEN-EN-1991-1-4, 2005): 0.012.

Om een duidelijk beeld te krijgen zijn de gegevens in tabel 4 naast elkaar gezet. Er zit een duidelijk verschil tussen de twee proeven.

| Massa | λ berekend Ø8mm staal | λ berekend rubber Shore 40A |
|---|---|---|
| **10** | 0.023 | 0.043 |
| **20** | 0.017 | 0.036 |
| **30** | 0.012 | 0.025 |
| **40** | 0.016 | 0.018 |
| **50** | 0.010 | 0.018 |
| **60** | 0.015 | 0.019 |
| **70** | 0.009 | 0.020 |
| **80** | 0.012 | 0.020 |

Tabel 4. Het logaritmische decrement van de twee proeven.

Het verschil is nog duidelijker in figuur 5.5. In deze grafiek staat de data van de twee proeven. Opvallend is dat de eerste drie stappen een lineair verband lijken te vertonen. Echter verdwijnt dit vanaf een massa van 40kg. Het is belangrijk om te zien dat in deze grafiek een standaarddeviatie wordt aangegeven van 0.01. Zoals te zien in tabellen 1, 2 en 3 is deze standaarddeviatie in veel gevallen een stuk hoger. Als dat in acht wordt genomen zijn er veel overlappende gegevens.




Figuur 5.5. Plot van de demping uitgezet tegen de massa. Gegevens uit tabel 3.

## 5.4 Toepassing

De proeven zijn uitvoert met een enkele cantilever of rubberophanging. In de praktijk zullen deze worden verwerkt in subassemblage die de demper vormt zoals de voorbeelden in paragraaf 2.1.3. In de subassemblage zullen drie of meer van deze pendels met elk een eigen massa worden verwerkt om zo de demper te vormen. Zo wordt het gewicht verdeeld over de schoorsteenwand en wordt de schoorsteen niet onnodig uit balans gebracht.

Door dat er meerdere pendels worden gebruikt neemt het totale demping toe. Immers, de tegen werkende kracht van een demper wordt gegeven door (Koten, 1977):

$$F = c_1 * \dot{x} \qquad [5.1]$$

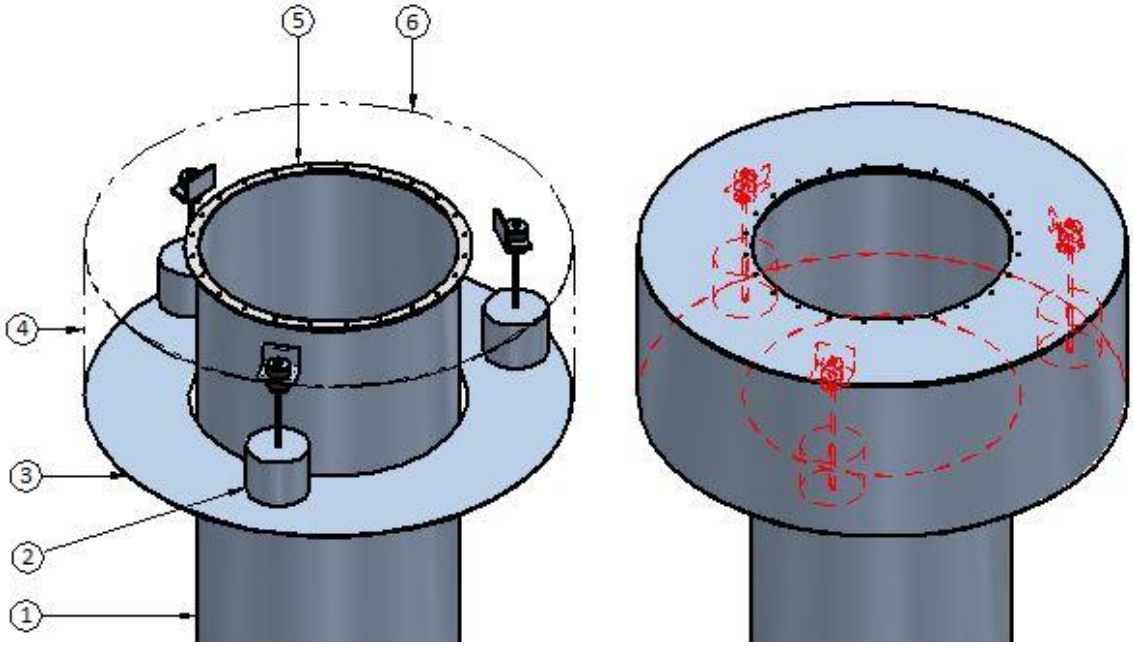
De waarde van dempingconstante c wordt bepaald door het aantal pendels. Als er drie pendels worden toegepast zal de kracht drie keer zo groot worden:

$$3 * F = c_3 * \dot{x} \qquad [5.2]$$

Dit heeft tot gevolg dat de nieuwe demping voor drie pendels drie keer zo groot is:

$$c_3 = \frac{3*F}{\dot{x}} \qquad [5.3]$$

Door de concepten op deze manier toe te passen kunnen hogere waardes voor het logaritmisch decrement worden behaald. Een voorbeeld hiervan is te zien in figuur 5.6. Een flens ⑤ is vast gelast aan de schoorsteenmantel ①. Aan deze flens wordt de topplaat ⑥ gemonteerd met behulp van bouten. De pendels ② zijn vast gelast aan deze topplaat. Met een rompdeel ④ en een bodemplaat ③ wordt het geheel omsloten.




Figuur 5.6. Conceptmodel van een demper waar rubber pendels zijn toegepast.

De benadering is erg vereenvoudigt, er wordt aangenomen dat de snelheid $\dot{x}$ gelijk blijft. In de praktijk zal dit zeer waarschijnlijk niet zo zijn.

# 6. Conclusie

Dit onderzoek is gestart met de vraag om de demping te onderzoeken van een cantilever met een massa aan het eind zoals geschetst in figuur 1.2. Het doel van deze vraag was om onderzoek te doen naar de toepassing van materiaaldemping in een trillingdemper voor een schoorsteen. Een manier om de demping te kwantificeren is het logaritmisch decrement. Het onderzoek richtte zich dan ook op het bepalen van het logaritmisch decrement voor verschillende situaties.

Het logaritmisch decrement dat is berekend naar aanleiding van proeven met een ingeklemde staaf is een factor 10 lager dan dat gebruikelijk is bij een rol-ring-demper. Met een waarde van 0.014 komt deze overeen met in de norm (NEN-EN-1991-1-4, 2005) gedicteerde waarde voor het logaritmisch decrement van stalen schoorstenen. In de praktijk kan de demping van de schoorsteen verder worden verhoogd door het toepassen van meerdere ophangingen. Een logaritmische decrement van 0.04 voor ingeklemd staal is op deze manier haalbaar. Deze waarde is nog steeds erg laag, bijna de helft van de demping van een rol-ring-demper.

Bij een toepassing met rubber ophangingpunten ligt het logaritmisch decrement iets hoger. Uit de testen met de toenemende massa blijkt wederom dat er geen constant verband zit tussen de massa en het logaritmisch decrement. Wel neemt de eigenfrequentie af naarmate de massa toe neemt.

Om de invloed van de frequentie te testen op de demping is er een test uitgevoerd bij een constante massa waarbij de pendellengte in stappen van 30 millimeter werd verkleind. Uit de resultaten blijkt dat de eigenfrequentie stijgt met een kortere pendel. Ook neemt het logaritmisch decrement toe met een hogere frequentie. Het lijkt er dus op dat een oplossing voor de praktijk moet worden gezocht in een toepassing met rubber, de dempende waardes komen nog niet in de buurt van die van de huidige dempers maar bieden zeker perspectief. Verder onderzoek zal moeten uitwijzen hoe haalbaar dit is. Indien een schoorsteen niet al te veel gedempt hoeft te worden zou de uitvoering met rubber voldoende kunnen zijn bij toepassing van een aantal dempers.

# 7. Aanbevelingen

Tijdens het testen van de ingeklemde staaf is ontdekt dat de frequentie van het systeem veranderd als de massa veranderd. Het is interessant voor de toepassing op een schoorsteen om de demping te bepalen bij een constante eigenfrequentie. Dit kan bereikt worden door de pendellengte aan te passen voor elke verandering van de massa. Het wordt dan ook aangeraden om bij een vervolg studie deze aanpassing te testen.

Bij het toepassen van rubber is het van belang om de omgevingsomstandigheden te weten in de demper ruimte bovenaan de schoorsteen. Het effect van warmte en rookgas kan invloed hebben op de prestatie en de levensduur van het rubber. Voor dat dit concept in de praktijk wordt toegepast moeten deze gevolgen in kaart worden gebracht. Het testen op ware grote zou dan ook waardevolle informatie opleveren.

# 8. Bibliografie

BN. Dynamische demper. *General Arrangement.* Bos Nieuwerkerk, Nieuwerkerk a/d IJssel.

BN. Rol ring demper. *General Arrangement.* Bos Nieuwerkerk, Nieuwerkerk a/d IJssel.

BN. Schoorsteen met trillingsdemper. *Schoorsteen.* Bos Nieuwerkerk, Nieuwerkerk a/d IJssel.

DVM. RD 251 (D). *Flexible stabilizer.* Rubber Design, Heerjansdam.

Hibbeler, R. (2008). *Mechanics of Materials.* Delft: Pearson.

Hibbeler, R. (2009). *Statics.* Delft: Pearson.

Hopkinson, B. Stress-strain diagram closed loop. *The Elastic Hysterisis of Steel.* Royal Society Publishing, -.

Kelly, P. external force pulling two molecules/particles apart. *Solid Mechanics Part I.* The University of Auckland 2013, Auckland.

Koten, H. v. (1977). Structural damping. *Heron journal* , Vol. 22 (1977) No. 4, pp. 1-74.

Meyers, M. (2009). *Mechanical Behavior of Materials.* Cambridge: Cambridge University Press.

Miroslav Holeček, P. K. Flexible balls connecte with linear springs. *Mechanical Propeties of Living Cells and Tissues Related to Thermodynamics, Experiments and Quantitative Morphology.* Intechopen, Prague.

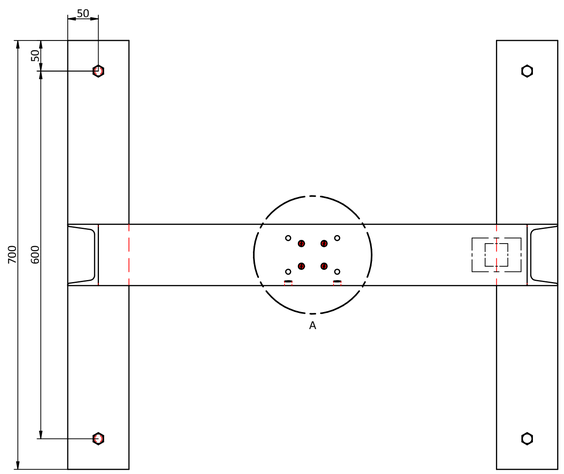
NEN-EN-1991-1-4. (2005). *Eurocode 1: Belastingen op constructies - Deel 1-4: Algemene belastingen - Windbelasting.* Delft: Nederlands Normalisatie-instituut.

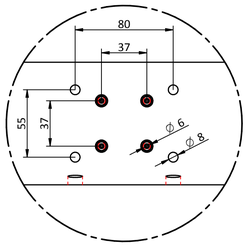
Vandepitte, D. (2003, Januari 29). *Berekening van constructies boekdeel I*. Opgeroepen op April 13, 2016, van Berekening van constructies: http://www.berekeningvanconstructies.be/index.htm

Vandepitte, D. Wervelstraat. *Berekening van constructies.* Universiteit Gent, Gent.

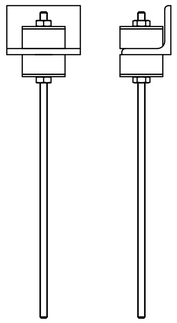
# 9. Bijlagen

| | |
|---|---|
| Bijlage I | Productie tekening |
| Bijlage II | Vermoeiing |
| Bijlage III | Meet onzekerheid |
| Bijlage IV | Meet resultaten |
| Bijlage V | Methodisch ontwerpen |
| Bijlage VI | Rekentabellen |
| Bijlage VII | Competentieomschrijving |

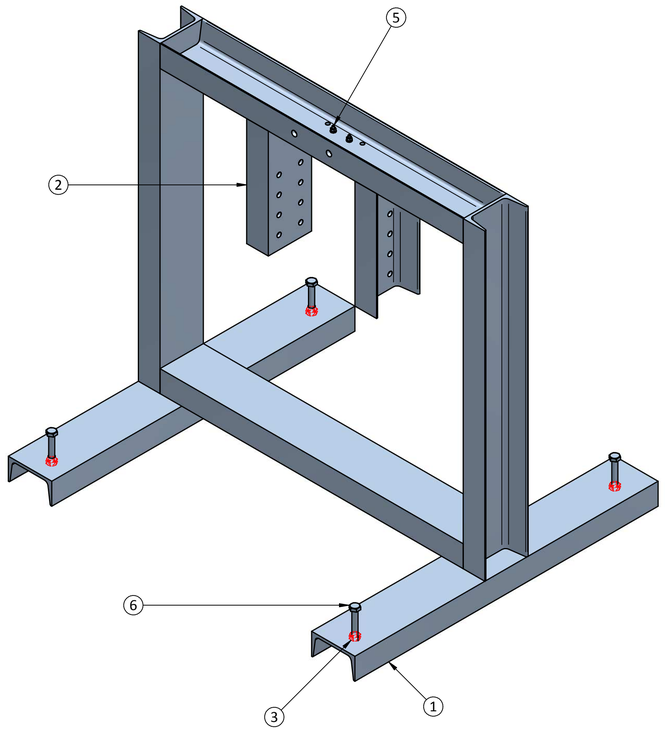


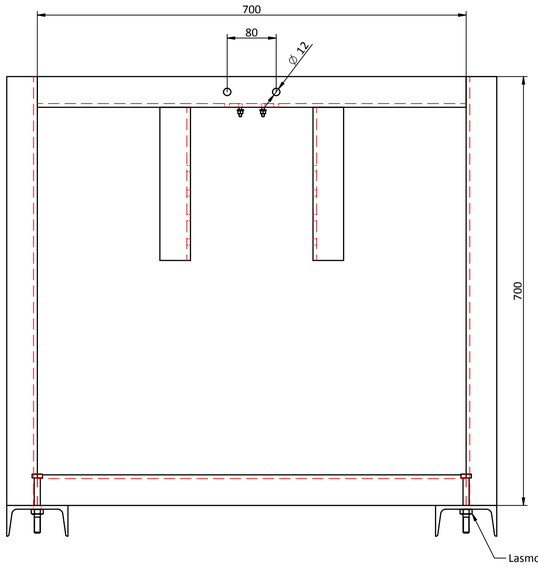



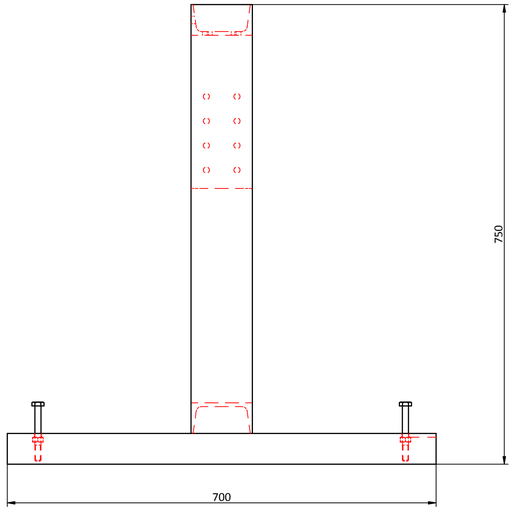

DETAIL A

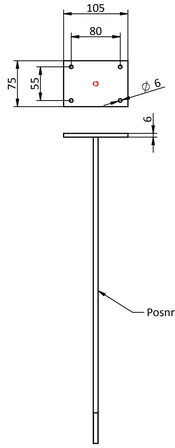


Posnr. 10
1:5

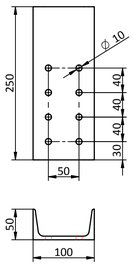


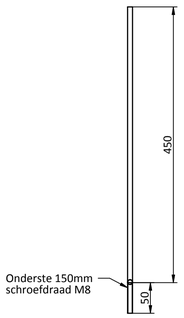



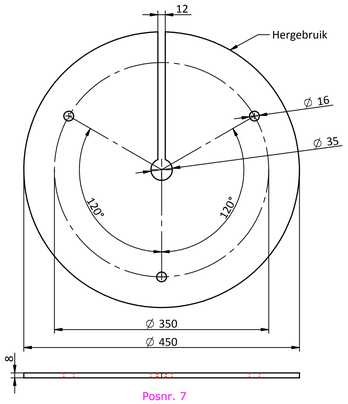

Koppelplaat met
proefstaaf
1:5



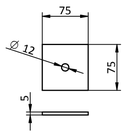

Posnr. 4
1:5




Posnr. 6
1:5




Posnr. 7
1:5




Posnr. 8
1:5

Massa: +/- 78kg

| IC | Posnr | Aantal | Benaming | Materialen en/of Halffabrikaten | Afmeting en/of Normaanduiding | Opmerkingen |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 10 | 1 | Rubberophanging | - | Shore 40A rubber | Inkoop |
| | 9 | 1 | Koppelplaat | 1.0038 (S235JR) | - | - |
| | 8 | 1 | Steunplaat | 1.0038 (S235JR) | - | - |
| | 7 | 7 | Massa schijf | 1.0038 (S235JR) | D=8 | Hergebruik |
| | 6 | 1 | Proefstaaf | 1.0038 (S235JR) | ø8mm | - |
| | 5 | 4 | Draadverbinding | St. Elvz. Kl8.8 | M6x33,2 | DIN975/934/125-1A |
| | 4 | 4 | Bout | St. Elvz. Kl8.8 | M10x90 | DIN931 |
| | 3 | 4 | Moer | St. Elvz. Kl8.8 | M10 | DIN934 |
| | 2 | 2 | UNP profiel | 1.0038 (S235JR) | UNP 100 | EN 10025 |
| | 1 | 1 | SA100 Frame | 1.0038 (S235JR) | UNP 100 | EN 10025 |

| EN ISO 13920 Maattol. C | 2 t/m 30 | 31 t/m 120 | 121 t/m 400 | 401 t/m 1000 | 1001 t/m 2000 | 2001 t/m 4000 | 4001 t/m 8000 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ± 1mm | ± 3mm | ± 4mm | ± 6mm | ± 8mm | ± 11mm | ± 14mm |

| Rev. | Datum | Omschrijving |
|---|---|---|
| | | |
| | | |
| | | |
| C | - | |
| B | - | |
| A | - | |

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

BOS NIEUWERKERK
Postbus 224
2910 AE Nieuwerkerk a/d IJssel
T.+31(0)180 312388
F.+31(0)180 315538
info@bosnieuwerkerk.nl
www.bosnieuwerkerk.nl

Getekend : wv
Gecontroleerd : JJ
Vrijgave : Ir. CB
Schaal : 1:5
Datum : 1-6-2016
Maateenheid : mm

Benaming : Test opstelling
Order nr. : -
Referentie: Afstuderen Willem
Projectie :
Tek.nr. : GA1
Rev. 0
formaat A1

Auteursrechten als vastgesteld in onze algemene leveringsvoorwaarden en condities.

# Bijlage II Vermoeiing van staal

Doordat in het onderzochte dempermodel gebruik wordt gemaakt van een ingeklemde staaf die wordt vervormd moet er rekening worden gehouden met vermoeiing van het staal. Vermoeiing is een vorm van slijtage die optreed bij wisselspanningen. Het is van belang om te weten onder hoeveel wisselingen het ontwerp komt te staan om te kunnen oordelen of niet vroegtijdig faalt.

Door het loslaten van de wervelingen gaat de schoorsteen trillen. Het aantal spanningswisselingen dat hier door ontstaat wordt beschreven in de NEN norm. Het aantal is te berekenen met de volgende vergelijking (NEN-EN-1991-1-4, 2005):

$$N = 2 * T * n_y * \varepsilon_0 * \left(\frac{v_{crit}}{v_0}\right)^2 * exp\left(-\left(\frac{v_{crit}}{v_0}\right)^2\right) \qquad \text{[II.1]}$$

Met:

$n_y$ Eigenfrequentie van de wind [Hertz]

$v_{crit}$ Kritische windsnelheid [m/s]

$v_0$ Staat gelijk aan 20% van de gemiddelde windsnelheid op de hoogte waar de wervels loslaten [m/s]

T Levensduur in seconden, gelijk aan 3,2 $10^7$ maal de verwachte levensduur in jaren.

$\varepsilon_0$ Bandbreedte factor die het verloop van de windsnelheden beschrijft waarbij vibraties ontstaan door het loslaten van de wervelingen. Hier moet een waarde van 0.3 worden aangenomen.

Om een indicatie aan te geven van het aantal spanningswisselingen is er een voorbeeldberekening uitgevoerd. Een schoorsteen wordt berekend voor een levensduur van 30 jaar. In een perfect scenario gaat demper net zo lang mee. Er wordt een kritische windsnelheid aangenomen van 3 m/s en voor $v_0$ een waarde van 6. Voor de eigenfrequentie van de schoorsteen wordt 1,5 hertz gebruikt. Met behulp van formule [II.1] is berekend dat er $1.68*10^8$ cyclussen van wisselspanning zijn.

Er is echter nog te weinig bekend van de echte spanningen in het materiaal om uitsluitend oordeel te geven over hoe lang de demper blijft functioneren. Zoals aanbevolen in hoofdstuk 7 is er meer onderzoek nodig met toepassing in de echte wereld om deze vraag te beantwoorden.

# Bijlage III Meet onzekerheid

Na dat de metingen zijn uitgevoerd, zijn de gegevens verwerkt in een tabel. Omdat er bij het uitvoeren van metingen altijd een bepaalde onzekerheid is, is het belangrijk om te weten hoe dicht deze waardes rondom het gemiddelde liggen. Een indicator hiervoor is de standaarddeviatie.

De standaarddeviatie wordt ook de fout in het gemiddelde genoemd of de standaardafwijking. Deze afwijking wordt geven door de onderstaande vergelijking:

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum(x_i - \bar{x})^2}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| Waarin: | $S_x$ | = | de standaarddeviatie van getallenreeks x |
| | $x_i$ | = | de waarde van een getal in de reeks |
| | $\bar{x}$ | = | het gemiddelde van alle getallen in de reeks |
| | $n$ | = | het aantal getallen in de reeks |

De standaarddeviatie kan in Excel worden berekend met een geïntegreerde functie (stddev). De tabellen met de berekening zijn terug te vinden in bijlage IV.

# Bijlage IV Meet resultaten

Deze bijlage bevat de tabellen met de meetresultaten en berekende waardes die daaruit volgen. Onderaan de kolommen Log decr. (logaritmisch decrement) en Eigenfreq. (eigenfrequentie) staat in het oranje de gemiddelde waarde en in het groen de standaarddeviatie.

Data: 8mm staal S235 Datum: 29 april 2016 Lengte cantilever: 465mm

| 10 kg | Start ampl. | Eind ampl. | T start | T eind | Amp. Verhouding | C/Ccr | Log decr. | Eigenfreq. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Test 1 | 10,00 | 7,00 | 3,67 | 9,50 | 0,965 | 0,006 | 0,036 | 1,72 |
| Test 2 | 9,00 | 7,80 | 5,68 | 11,41 | 0,986 | 0,002 | 0,014 | 1,75 |
| Test 3 | 10,50 | 8,50 | 2,21 | 7,94 | 0,979 | 0,003 | 0,021 | 1,75 |
| Test 4 | 10,00 | 8,50 | 3,34 | 9,07 | 0,984 | 0,003 | 0,016 | 1,75 |
| Test 5 | 9,80 | 7,40 | 1,96 | 7,68 | 0,972 | 0,004 | 0,028 | 1,75 |
| | | | | | | gem. | 0,023 | 1,74 |
| | | | | | | stddev | 0,006 | 0,01 |

| 20 kg | Start ampl. | Eind ampl. | T start | T eind | Amp. Verhouding | C/Ccr | Log decr. | Eigenfreq. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Test 1 | 9,50 | 8,00 | 3,24 | 10,47 | 0,983 | 0,003 | 0,017 | 1,38 |
| Test 2 | 9,50 | 8,00 | 3,41 | 10,70 | 0,983 | 0,003 | 0,017 | 1,37 |
| Test 3 | 10,00 | 8,40 | 1,85 | 9,07 | 0,983 | 0,003 | 0,017 | 1,39 |
| Test 4 | 10,00 | 8,00 | 2,34 | 9,60 | 0,978 | 0,004 | 0,022 | 1,38 |
| Test 5 | 9,50 | 8,60 | 1,38 | 8,57 | 0,990 | 0,002 | 0,010 | 1,39 |
| Test 6 | 10,00 | 8,50 | 2,60 | 9,87 | 0,984 | 0,003 | 0,016 | 1,38 |
| | | | | | | gem. | 0,017 | 1,38 |
| | | | | | | stddev | 0,004 | 0,01 |

| 30 kg | Start ampl. | Eind ampl. | T start | T eind | Amp. Verhouding | C/Ccr | Log decr. | Eigenfreq. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Test 1 | 9,00 | 7,50 | 1,94 | 10,14 | 0,982 | 0,003 | 0,018 | 1,22 |
| Test 2 | 9,60 | 8,20 | 4,39 | 12,54 | 0,984 | 0,003 | 0,016 | 1,23 |
| Test 3 | 8,60 | 7,50 | 1,87 | 10,00 | 0,986 | 0,002 | 0,014 | 1,23 |
| Test 4 | 9,40 | 8,50 | 2,90 | 11,03 | 0,990 | 0,002 | 0,010 | 1,23 |
| Test 5 | 9,40 | 8,50 | 2,94 | 11,04 | 0,990 | 0,002 | 0,010 | 1,23 |
| Test 6 | 7,80 | 7,20 | 1,44 | 9,54 | 0,992 | 0,001 | 0,008 | 1,23 |
| Test 7 | 9,50 | 8,50 | 2,08 | 10,17 | 0,989 | 0,002 | 0,011 | 1,24 |
| | | | | | | gem. | 0,012 | 1,23 |
| | | | | | | stddev | 0,004 | 0,01 |

| 40 kg | Start ampl. | Eind ampl. | T start | T eind | Amp. Verhouding | C/Ccr | Log decr. | Eigenfreq. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Test 1 | 9,40 | 8,00 | 2,94 | 11,77 | 0,984 | 0,003 | 0,016 | 1,13 |
| Test 2 | 9,80 | 8,50 | 2,61 | 11,39 | 0,986 | 0,002 | 0,014 | 1,14 |
| Test 3 | 9,80 | 8,40 | 2,23 | 10,97 | 0,985 | 0,002 | 0,015 | 1,14 |
| Test 4 | 9,60 | 7,50 | 3,00 | 11,73 | 0,976 | 0,004 | 0,025 | 1,15 |
| Test 5 | 9,60 | 8,60 | 1,80 | 10,57 | 0,989 | 0,002 | 0,011 | 1,14 |
| | | | | | | gem. | 0,016 | 1,14 |
| | | | | | | stddev | 0,005 | 0,01 |

| 50 kg | Start ampl. | Eind ampl. | T start | T eind | Amp. Verhouding | C/Ccr | Log decr. | Eigenfreq. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Test 1 | 9,50 | 9,00 | 2,58 | 11,70 | 0,995 | 0,001 | 0,005 | 1,10 |
| Test 2 | 10,00 | 8,80 | 2,05 | 11,24 | 0,987 | 0,002 | 0,013 | 1,09 |
| Test 3 | 9,60 | 8,60 | 1,95 | 11,11 | 0,989 | 0,002 | 0,011 | 1,09 |
| Test 4 | 9,60 | 8,60 | 4,08 | 13,24 | 0,989 | 0,002 | 0,011 | 1,09 |
| Test 5 | 10,00 | 9,20 | 2,91 | 12,04 | 0,992 | 0,001 | 0,008 | 1,10 |
| | | | | | | gem. | 0,010 | 1,09 |
| | | | | | | stddev | 0,003 | 0,00 |

| 60 kg | Start ampl. | Eind ampl. | T start | T eind | Amp. Verhouding | C/Ccr | Log decr. | Eigenfreq. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Test 1 | 11,00 | 9,40 | 2,88 | 12,31 | 0,984 | 0,003 | 0,016 | 1,06 |
| Test 2 | 10,20 | 8,50 | 4,97 | 14,57 | 0,982 | 0,003 | 0,018 | 1,04 |
| Test 3 | 9,00 | 7,50 | 2,42 | 11,98 | 0,982 | 0,003 | 0,018 | 1,05 |
| Test 4 | 9,40 | 8,50 | 5,04 | 14,54 | 0,990 | 0,002 | 0,010 | 1,05 |
| Test 5 | 10,00 | 8,80 | 2,97 | 12,50 | 0,987 | 0,002 | 0,013 | 1,05 |
| | | | | | | gem. | 0,015 | 1,05 |
| | | | | | | stddev | 0,004 | 0,01 |

| 70 kg | Start ampl. | Eind ampl. | T start | T eind | Amp. Verhouding | C/Ccr | Log decr. | Eigenfreq. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Test 1 | 10,00 | 8,80 | 3,35 | 13,14 | 0,987 | 0,002 | 0,013 | 1,02 |
| Test 2 | 9,70 | 9,00 | 2,73 | 12,50 | 0,993 | 0,001 | 0,007 | 1,02 |
| Test 3 | 9,50 | 8,50 | 0,57 | 10,40 | 0,989 | 0,002 | 0,011 | 1,02 |
| Test 4 | 10,00 | 9,20 | 2,04 | 11,81 | 0,992 | 0,001 | 0,008 | 1,02 |
| Test 5 | 9,50 | 8,80 | 2,96 | 12,68 | 0,992 | 0,001 | 0,008 | 1,03 |
| | | | | | | gem. | 0,009 | 1,02 |
| | | | | | | stddev | 0,002 | 0,00 |

| 80 kg | Start ampl. | Eind ampl. | T start | T eind | Amp. Verhouding | C/Ccr | Log decr. | Eigenfreq. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Test 1 | 9,00 | 7,80 | 3,27 | 13,37 | 0,986 | 0,002 | 0,014 | 0,99 |
| Test 2 | 9,50 | 8,80 | 2,19 | 12,11 | 0,992 | 0,001 | 0,008 | 1,01 |
| Test 3 | 9,60 | 8,80 | 3,35 | 13,31 | 0,991 | 0,001 | 0,009 | 1,00 |
| Test 4 | 9,60 | 7,80 | 6,11 | 16,21 | 0,979 | 0,003 | 0,021 | 0,99 |
| Test 5 | 11,00 | 9,50 | 6,14 | 16,14 | 0,985 | 0,002 | 0,015 | 1,00 |
| Test 6 | 9,50 | 8,50 | 3,85 | 13,84 | 0,989 | 0,002 | 0,011 | 1,00 |
| Test 7 | 8,80 | 8,00 | 3,61 | 13,61 | 0,991 | 0,002 | 0,010 | 1,00 |
| | | | | | | gem. | 0,012 | 1,00 |
| | | | | | | stddev | 0,005 | 0,01 |

Data: Rubber hardheid 40 Shore A Datum: 24 mei 2016 Lengte cantilever: 465mm

| 10 kg | Start ampl. | Eind ampl. | T start | T eind | Amp. Verhouding | C/Ccr | Log decr. | Eigenfreq. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Test 1 | 10,00 | 6,70 | 4,11 | 11,87 | 0,961 | 0,006 | 0,040 | 1,29 |
| Test 2 | 14,50 | 9,30 | 4,27 | 12,14 | 0,957 | 0,007 | 0,044 | 1,27 |
| Test 3 | 16,00 | 10,50 | 3,25 | 11,04 | 0,959 | 0,007 | 0,042 | 1,28 |
| Test 4 | 15,50 | 10,00 | 3,27 | 11,07 | 0,957 | 0,007 | 0,044 | 1,28 |
| Test 5 | 15,60 | 10,50 | 3,98 | 11,74 | 0,961 | 0,006 | 0,040 | 1,29 |
| Test 6 | 20,50 | 12,50 | 4,53 | 12,37 | 0,952 | 0,008 | 0,049 | 1,28 |
| Test 7 | 20,50 | 13,60 | 1,98 | 9,77 | 0,960 | 0,007 | 0,041 | 1,28 |
| | | | | | | | 0,043 | 1,28 |
| | | | | | | stddev | 0,003 | 0,01 |

| 20 kg | Start ampl. | Eind ampl. | T start | T eind | Amp. Verhouding | C/Ccr | Log decr. | Eigenfreq. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Test 1 | 19,50 | 14,50 | 5,12 | 14,67 | 0,971 | 0,005 | 0,030 | 1,05 |
| Test 2 | 21,00 | 15,00 | 3,57 | 13,10 | 0,967 | 0,005 | 0,034 | 1,05 |
| Test 3 | 20,00 | 13,60 | 3,11 | 12,64 | 0,962 | 0,006 | 0,039 | 1,05 |
| Test 4 | 20,00 | 13,30 | 3,97 | 13,54 | 0,960 | 0,006 | 0,041 | 1,04 |
| Test 5 | 20,00 | 13,70 | 2,87 | 12,47 | 0,963 | 0,006 | 0,038 | 1,04 |
| Test 6 | 20,00 | 14,00 | 2,94 | 12,44 | 0,965 | 0,006 | 0,036 | 1,05 |
| Test 7 | 20,50 | 14,00 | 3,61 | 13,10 | 0,963 | 0,006 | 0,038 | 1,05 |
| | | | | | | | 0,036 | 1,05 |
| | | | | | | stddev | 0,004 | 0,00 |

| 30 kg | Start ampl. | Eind ampl. | T start | T eind | Amp. Verhouding | C/Ccr | Log decr. | Eigenfreq. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Test 1 | 20,00 | 15,70 | 4,10 | 14,53 | 0,976 | 0,004 | 0,024 | 0,96 |
| Test 2 | 19,50 | 15,50 | 4,42 | 14,84 | 0,977 | 0,004 | 0,023 | 0,96 |
| Test 3 | 21,00 | 16,70 | 4,74 | 15,14 | 0,977 | 0,004 | 0,023 | 0,96 |
| Test 4 | 19,50 | 14,60 | 3,27 | 13,70 | 0,971 | 0,005 | 0,029 | 0,96 |
| Test 5 | 21,40 | 16,60 | 2,74 | 13,17 | 0,975 | 0,004 | 0,025 | 0,96 |
| Test 6 | 20,40 | 15,50 | 3,87 | 14,30 | 0,973 | 0,004 | 0,027 | 0,96 |
| Test 7 | 20,00 | 15,50 | 3,31 | 13,77 | 0,975 | 0,004 | 0,025 | 0,96 |
| | | | | | | | 0,025 | 0,96 |
| | | | | | | stddev | 0,002 | 0,00 |

| 40 kg | Start ampl. | Eind ampl. | T start | T eind | Amp. Verhouding | C/Ccr | Log decr. | Eigenfreq. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Test 1 | 19,60 | 16,50 | 3,25 | 14,27 | 0,983 | 0,003 | 0,017 | 0,91 |
| Test 2 | 20,50 | 17,50 | 2,38 | 13,41 | 0,984 | 0,003 | 0,016 | 0,91 |
| Test 3 | 21,00 | 17,50 | 3,40 | 14,40 | 0,982 | 0,003 | 0,018 | 0,91 |
| Test 4 | 21,30 | 17,50 | 2,53 | 13,60 | 0,981 | 0,003 | 0,020 | 0,90 |
| Test 5 | 21,50 | 17,50 | 3,63 | 14,64 | 0,980 | 0,003 | 0,021 | 0,91 |
| Test 6 | 19,50 | 16,50 | 2,87 | 13,87 | 0,983 | 0,003 | 0,017 | 0,91 |
| | | | | | | | 0,018 | 0,91 |
| | | | | | | stddev | 0,002 | 0,00 |

| 50 kg | Start ampl. | Eind ampl. | T start | T eind | Amp. Verhouding | C/Ccr | Log decr. | Eigenfreq. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Test 1 | 20,00 | 17,50 | 4,54 | 16,00 | 0,987 | 0,002 | 0,013 | 0,87 |
| Test 2 | 21,00 | 18,30 | 3,75 | 15,21 | 0,986 | 0,002 | 0,014 | 0,87 |
| Test 3 | 20,50 | 17,50 | 2,33 | 13,80 | 0,984 | 0,003 | 0,016 | 0,87 |
| Test 4 | 21,00 | 17,20 | 4,31 | 15,77 | 0,980 | 0,003 | 0,020 | 0,87 |
| Test 5 | 22,20 | 17,30 | 3,30 | 14,87 | 0,975 | 0,004 | 0,025 | 0,86 |
| | | | | | | | 0,018 | 0,87 |
| | | | | | | stddev | 0,005 | 0,00 |

| 60 kg | Start ampl. | Eind ampl. | T start | T eind | Amp. Verhouding | C/Ccr | Log decr. | Eigenfreq. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Test 1 | 22,70 | 18,30 | 3,11 | 14,90 | 0,979 | 0,003 | 0,022 | 0,85 |
| Test 2 | 21,70 | 18,70 | 2,81 | 12,24 | 0,985 | 0,002 | 0,015 | 1,06 |
| Test 3 | 20,00 | 16,80 | 3,28 | 15,07 | 0,983 | 0,003 | 0,017 | 0,85 |
| Test 4 | 21,50 | 16,80 | 3,70 | 15,57 | 0,976 | 0,004 | 0,025 | 0,84 |
| Test 5 | 20,70 | 17,70 | 2,92 | 14,64 | 0,984 | 0,002 | 0,016 | 0,85 |
| | | | | | | | 0,019 | 0,89 |
| | | | | | | stddev | 0,004 | 0,10 |

| 70 kg | Start ampl. | Eind ampl. | T start | T eind | Amp. Verhouding | C/Ccr | Log decr. | Eigenfreq. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Test 1 | 20,50 | 17,30 | 3,25 | 15,17 | 0,983 | 0,003 | 0,017 | 0,84 |
| Test 2 | 20,50 | 16,80 | 4,74 | 16,70 | 0,980 | 0,003 | 0,020 | 0,84 |
| Test 3 | 21,70 | 17,50 | 3,64 | 15,60 | 0,979 | 0,003 | 0,022 | 0,84 |
| Test 4 | 21,50 | 17,30 | 2,86 | 14,81 | 0,978 | 0,003 | 0,022 | 0,84 |
| Test 5 | 22,00 | 17,50 | 2,37 | 14,34 | 0,977 | 0,004 | 0,023 | 0,84 |
| Test 6 | 21,00 | 17,50 | 2,46 | 14,41 | 0,982 | 0,003 | 0,018 | 0,84 |
| | | | | | | | 0,020 | 0,84 |
| | | | | | | stddev | 0,002 | 0,00 |

Data: Rubber hardheid 40 Shore A Datum: 26 mei 2016 Lengte cantilever: variërend
Massa: 30kg

| L = 445 | Start ampl. | Eind ampl. | T start | T eind | Amp. Verhouding | C/Ccr | Log decr. | Eigenfreq. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Test 1 | 20,00 | 15,70 | 4,10 | 14,53 | 0,976 | 0,004 | 0,024 | 0,96 |
| Test 2 | 19,50 | 15,50 | 4,42 | 14,84 | 0,977 | 0,004 | 0,023 | 0,96 |
| Test 3 | 21,00 | 16,70 | 4,74 | 15,14 | 0,977 | 0,004 | 0,023 | 0,96 |
| Test 4 | 19,50 | 14,60 | 3,27 | 13,70 | 0,971 | 0,005 | 0,029 | 0,96 |
| Test 5 | 21,40 | 16,60 | 2,74 | 13,17 | 0,975 | 0,004 | 0,025 | 0,96 |
| Test 6 | 20,40 | 15,50 | 3,87 | 14,30 | 0,973 | 0,004 | 0,027 | 0,96 |
| Test 7 | 20,00 | 15,50 | 3,31 | 13,77 | 0,975 | 0,004 | 0,025 | 0,96 |
| | | | | | | | 0,025 | 0,96 |
| | | | | | | stddev | 0,002 | 0,00 |

| L = 415 | Start ampl. | Eind ampl. | T start | T eind | Amp. Verhouding | C/Ccr | Log decr. | Eigenfreq. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Test 1 | 22,00 | 16,50 | 5,14 | 15,24 | 0,972 | 0,005 | 0,029 | 0,99 |
| Test 2 | 23,30 | 17,50 | 4,00 | 14,11 | 0,972 | 0,005 | 0,029 | 0,99 |
| Test 3 | 22,30 | 17,20 | 3,17 | 13,27 | 0,974 | 0,004 | 0,026 | 0,99 |
| Test 4 | 21,70 | 16,70 | 4,17 | 14,28 | 0,974 | 0,004 | 0,026 | 0,99 |
| Test 5 | 22,20 | 17,00 | 3,00 | 13,14 | 0,974 | 0,004 | 0,027 | 0,99 |
| | | | | | | | 0,027 | 0,99 |
| | | | | | | stddev | 0,001 | 0,00 |

| L = 385 | Start ampl. | Eind ampl. | T start | T eind | Amp. Verhouding | C/Ccr | Log decr. | Eigenfreq. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Test 1 | 21,70 | 15,30 | 4,04 | 13,68 | 0,966 | 0,006 | 0,035 | 1,04 |
| Test 2 | 22,50 | 16,50 | 4,13 | 13,74 | 0,969 | 0,005 | 0,031 | 1,04 |
| Test 3 | 22,00 | 16,30 | 3,30 | 12,94 | 0,970 | 0,005 | 0,030 | 1,04 |
| Test 4 | 20,70 | 15,50 | 3,13 | 12,77 | 0,971 | 0,005 | 0,029 | 1,04 |
| Test 5 | 20,00 | 13,70 | 3,07 | 12,77 | 0,963 | 0,006 | 0,038 | 1,03 |
| Test 6 | 22,10 | 15,70 | 3,47 | 13,14 | 0,966 | 0,005 | 0,034 | 1,03 |
| | | | | | | | 0,033 | 1,04 |
| | | | | | | stddev | 0,003 | 0,00 |

| L = 355 | Start ampl. | Eind ampl. | T start | T eind | Amp. Verhouding | C/Ccr | Log decr. | Eigenfreq. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Test 1 | 22,00 | 16,00 | 4,57 | 13,71 | 0,969 | 0,005 | 0,032 | 1,09 |
| Test 2 | 23,00 | 16,00 | 2,60 | 11,71 | 0,964 | 0,006 | 0,036 | 1,10 |
| Test 3 | 24,00 | 17,00 | 2,13 | 11,24 | 0,966 | 0,005 | 0,034 | 1,10 |
| Test 4 | 23,00 | 17,00 | 1,87 | 10,97 | 0,970 | 0,005 | 0,030 | 1,10 |
| Test 5 | 19,00 | 14,00 | 3,77 | 12,87 | 0,970 | 0,005 | 0,031 | 1,10 |
| Test 6 | 22,00 | 16,00 | 2,63 | 11,81 | 0,969 | 0,005 | 0,032 | 1,09 |
| Test 7 | 21,00 | 14,00 | 3,10 | 12,27 | 0,960 | 0,006 | 0,041 | 1,09 |
| | | | | | | | 0,034 | 1,10 |
| | | | | | | stddev | 0,004 | 0,00 |

| L = 325 | Start ampl. | Eind ampl. | T start | T eind | Amp. Verhouding | C/Ccr | Log decr. | Eigenfreq. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Test 1 | 21,00 | 15,50 | 4,60 | 11,54 | 0,970 | 0,005 | 0,030 | 1,44 |
| Test 2 | 24,40 | 16,70 | 2,27 | 10,94 | 0,963 | 0,006 | 0,038 | 1,15 |
| Test 3 | 22,20 | 15,30 | 2,97 | 11,61 | 0,963 | 0,006 | 0,037 | 1,16 |
| Test 4 | 23,30 | 15,70 | 3,17 | 11,84 | 0,961 | 0,006 | 0,039 | 1,15 |
| Test 5 | 22,20 | 15,50 | 3,13 | 11,81 | 0,965 | 0,006 | 0,036 | 1,15 |
| Test 6 | 23,00 | 15,00 | 6,17 | 14,84 | 0,958 | 0,007 | 0,043 | 1,15 |
| Test 7 | 22,70 | 15,00 | 5,60 | 14,24 | 0,959 | 0,007 | 0,041 | 1,16 |
| Test 8 | 23,50 | 16,70 | 2,63 | 11,31 | 0,966 | 0,005 | 0,034 | 1,15 |
| | | | | | | | 0,037 | 1,19 |
| | | | | | | stddev | 0,004 | 0,10 |

# Bijlage V Methodisch ontwerpen

In deze bijlage staan de tabellen die onderdeel zijn van het proces bij het methodisch ontwerpen. Onder andere de eisen en wensen, het morfologisch overzicht, en de score tabellen zijn hier te vinden.

| **Proefopstelling** | | |
|---|---|---|
| **Eis/Wens** | **Realiseren door** | **Obstakels** |
| De proefopstelling binnenshuis fabriceren | Ontwerpen met oog voor fabricage en montage mogelijkheden | |
| De proefopstelling economisch verantwoord uitvoeren | Vermijden van dure meetapparatuur. Gebruik maken materiaal dat op voorraad is. Hergebruiken van aanwezige middelen. | Nauwkeurige sensoren zijn erg duur. Nauwkeurige meetapparatuur met dataloggers zijn duur. |
| Meetresultaten duidelijk waar te nemen | Gebruik maken van afstandsmarkeringen. De beweging projecteren op de markeringen met behulp van een laser. | Voorspellen slingerrichting. |
| Nauwkeurige meetresultaten | Hoge stijfheid van de constructie: de constructie mag niet meegeven onder de dynamische belasting van demper. Slinger beweging vastleggen met hoge resolutie camera en voldoende frames per seconde | |
| Variëren van de massa | Gebruik maken van een systeem waarbij het gewicht kan verhoogd en verlaagd. | De massa mag niet gaan schuiven. |
| Variëren van de diameter van de proefstaven | Montage van de proefstaaf dus danig ontwerpen zodat hij eenvoudig kan worden verwisseld. | Nauwkeurige montage is vereist voor een stijf geheel. |
| Meten met variërende massa | De mogelijkheid creëren dat de massa met stappen van bijvoorbeeld 10kg kan worden verhoogd | Gewichten goed kunnen fixeren zodat het niet gaat schommelen |
| Stabiele camera beelden | Camera op statief | Positionering |
| Sensor met data logger | Sensor uitkiezen in combinatie met software | Veel variatie, kosten lopen snel op |

Tabel V.1. Eisen en wensen

In de bovenstaande tabel, tabel V.1, staan de eisen en wensen aan de proefopstelling. Bij elk punt wordt vermeld hoe het kan worden gerealiseerd en wat eventuele obstakels zijn.

Tabel V.2 laat zien op welke manieren de functie kunnen worden voltooid. Met hulp van nummers zijn er drie concepten samengesteld.

| **Functie** | **Werkwijze** | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Beeldregistratie** | Burst-mode camera | Videocamera ① | Telefooncamera ③ | Uitslagtekenen met potlood ② |
| **Aflezen meetresultaten** | Maatverdeling horizontaal langs proefstaaf ② | Laser pen + maatverdeling ①③ | | |
| **Meten afstandssensor en datalogger** | Sonische afstandsmeter | Laser afstandsmeter | Omgekeerde LED-sensor | |
| **Variëren massa** | Ringen | Vierkante plaat ② | Ronde plaat ① | Hergebruik ③ |
| **Variëren proefstaaf** | Schroefdraad op proefstaaf ① | Lasverbinding proefstaaf met montage plaat ③ | Inklemming ② | |

**Tabel V.2. Overzicht met verschillende werkwijzen per functie.**

**De drie concepten:**

Concept 1: De beeldregistratie gaat met behulp van een videocamera. Deze videocamera filmt de rode stip van een laser pen die beweegt over een roos. De massa zal worden gevormd door ronde platen die om de as heen kunnen worden schoven. De proefstaaf zal met behulp van schroefdraad direct in het frame worden gedraaid.

Concept 2: Concept 2 is gebaseerd op een seismograaf. De uitslag van de trilling wordt met behulp van een potlood op papier getekend. Dit papier zal een maatverdeling bevatten en horizontaal langs de beweging worden gepositioneerd. Voor het variëren van de massa wordt gebruik gemaakt van vierkante platen die op maat worden geknipt. De proefstaaf wordt ingeklemd doormiddel van speciale lijmklemmen.

Concept 3: Dit concept maakt gebruik van de film functie van een smartphone voor de beeldregistratie. Deze camera filmt net als in concept 1 een rode punt op een maatverdeling. Voor de massa in dit concept wordt gebruik gemaakt van massaschijven die al een eerder zijn toegepast. De proefstaaf wordt aan een koppelplaat gelast, deze plaat wordt vervolgens aan het frame vast gebout.

**Toelichting**

De afstandsensoren en dataloggers zijn niet opgenomen in de concepten. Uit vooronderzoek is gebleken dat nauwkeurige sensoren erg prijzig zijn en dat de software voor het verwerken van de data specialistische kennis vereist. Deze methode zou dus geen realistisch concept opleveren en is daarom niet verwerkt.

**Beoordeling van de concepten**

In de tabel V.3 worden de concepten beoordeeld. De concepten worden op de vier functie beoordeeld maar weegfactor van de drie variabele ontwerpvoorwaarden wordt ook meegenomen.

| | Weegfactor | Concept 1 | Concept 2 | Concept 3 |
|---|---|---|---|---|
| Beeldregistratie | n.v.t. | 3 | 1 | 2 |
| Aflezen meetresultaten | n.v.t. | 2 | 3 | 2 |
| Variëren massa | n.v.t. | 1 | 2 | 3 |
| Variëren proefstaaf | n.v.t. | 2 | 1 | 3 |
| Intern fabriceren | 20% | 1.2 (1) | 2.4 (2) | 3.6 (3) |
| Economisch uitvoeren | 40% | 1.4 (1) | 2.8 (2) | 4.2 (3) |
| Nauwkeurigheid | 40% | 4.2 (3) | 1.4 (1) | 2.8 (2) |
| Totaal score | | 14.8 | 13.6 | 20.6 |

**Tabel V.3. Beoordelingstabel van de concepten**

Per onderdeel kunnen er drie punten worden gehaald. Als de weegfactor van toepassing is wordt dit percentage er bovenopgeteld.

Concept 3 heeft de hoogste score behaald. Doorslaggevend voor de uitslag zijn de goedkope oplossingen geweest: hergebruik van staal en het gebruik van een smartphone voor het filmen. In paragraaf 4.2 is het uiteindelijke ontwerp te zien.

# Bijlage VI Rekentabellen

In deze bijlage staan de tabellen waarin de veerconstante en de eigenfrequentie worden berekend. Ook de tabel voor het berekenen van de maximale uitwijking van de 8 millimeter staaf wordt hier weergegeven.

Data beide berekeningen:

- Lengte cantilever: 465mm
- E modulus: 210000 N/mm$^2$
- Massa: 30 kg

### Massieve staaf

| ø [mm] | Straal r [mm] | I [mm^4] | veerconstante k | [N/mm] | Eigenfrequentie | [Hertz] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 20 | 10 | 7853,982 | 49,212 | | 6,45 | |
| 19 | 9,5 | 6397,117 | 40,084 | | 5,82 | |
| 18 | 9 | 5152,997 | 32,288 | | 5,22 | |
| 17 | 8,5 | 4099,828 | 25,689 | | 4,66 | |
| 16 | 8 | 3216,991 | 20,157 | | 4,13 | |
| 15 | 7,5 | 2485,049 | 15,571 | | 3,63 | |
| 14 | 7 | 1885,741 | 11,816 | | 3,16 | |
| 13 | 6,5 | 1401,985 | 8,785 | | 2,72 | |
| 12 | 6 | 1017,876 | 6,378 | | 2,32 | |
| 11 | 5,5 | 718,688 | 4,503 | | 1,95 | |
| 10 | 5 | 490,874 | 3,076 | | 1,61 | |
| 9 | 4,5 | 322,062 | 2,018 | | 1,31 | |
| 8 | 4 | 201,062 | 1,260 | | 1,03 | |
| 7 | 3,5 | 117,859 | 0,738 | | 0,79 | |
| 6 | 3 | 63,617 | 0,399 | | 0,58 | |
| 5 | 2,5 | 30,680 | 0,192 | | 0,40 | |
| 4 | 2 | 12,566 | 0,079 | | 0,26 | |

**Buis met wanddikte: 2 millimeter**

| ø uitw [mm] t=2 | ø inw [mm] | I [mm^4] | veerconstante k | [N/mm] | Eigenfrequentie | [Hertz] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 20 | 16 | 4636,991 | 29,055 | | 4,9530 | |
| 19 | 15 | 3912,068 | 24,513 | | 4,5494 | |
| 18 | 14 | 3267,256 | 20,472 | | 4,1576 | |
| 17 | 13 | 2697,843 | 16,904 | | 3,7780 | |
| 16 | 12 | 2199,115 | 13,779 | | 3,4109 | |
| 15 | 11 | 1766,360 | 11,068 | | 3,0570 | |
| 14 | 10 | 1394,867 | 8,740 | | 2,7165 | |
| 13 | 9 | 1079,922 | 6,767 | | 2,3903 | |
| 12 | 8 | 816,814 | 5,118 | | 2,0788 | |
| 11 | 7 | 600,830 | 3,765 | | 1,7829 | |
| 10 | 6 | 427,257 | 2,677 | | 1,5035 | |
| 9 | 5 | 291,383 | 1,826 | | 1,2416 | |
| 8 | 4 | 188,496 | 1,181 | | 0,9986 | |

**Bepaling van de maximale uitwijking**

Data:

- Lengte cantilever: 465mm
- E modulus: 210000 N/mm$^2$
- Vloeispanning: 235 N/mm$^2$
- Veilige vloeispanning: 200 N/mm$^2$
- Massieve staaf

| ø [mm] | W [mm^3] | σ [N/mm^2] | M [Nmm] | Kracht F [N] | I [mm^4] | vmax [mm] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 20 | 785,40 | 200 | 157080 | 338 | 7853,98 | 6,9 |
| 19 | 673,38 | 200 | 134676 | 290 | 6397,12 | 7,2 |
| 18 | 572,56 | 200 | 114511 | 246 | 5153,00 | 7,6 |
| 17 | 482,33 | 200 | 96467 | 207 | 4099,83 | 8,1 |
| 16 | 402,12 | 200 | 80425 | 173 | 3216,99 | 8,6 |
| 15 | 331,34 | 200 | 66268 | 143 | 2485,05 | 9,2 |
| 14 | 269,39 | 200 | 53878 | 116 | 1885,74 | 9,8 |
| 13 | 215,69 | 200 | 43138 | 93 | 1401,98 | 10,6 |
| 12 | 169,65 | 200 | 33929 | 73 | 1017,88 | 11,4 |
| 11 | 130,67 | 200 | 26134 | 56 | 718,69 | 12,5 |
| 10 | 98,17 | 200 | 19635 | 42 | 490,87 | 13,7 |
| 9 | 71,57 | 200 | 14314 | 31 | 322,06 | 15,3 |
| 8 | 50,27 | 200 | 10053 | 22 | 201,06 | 17,2 |

# Bijlage VII Competentiebeschrijving

Als onderdeel van de persoonlijke ontwikkeling en de opleiding werktuigbouwkunde is er aandacht voor competenties. Er zijn acht competenties waar naar wordt gekeken. Deze staan in figuur VII.1. De rode lijn geeft aan op welk niveau de competenties zijn bij de start van het afstudeertraject.

Figuur VII.1. Competentieprofiel bij aanvang van het afstuderen.

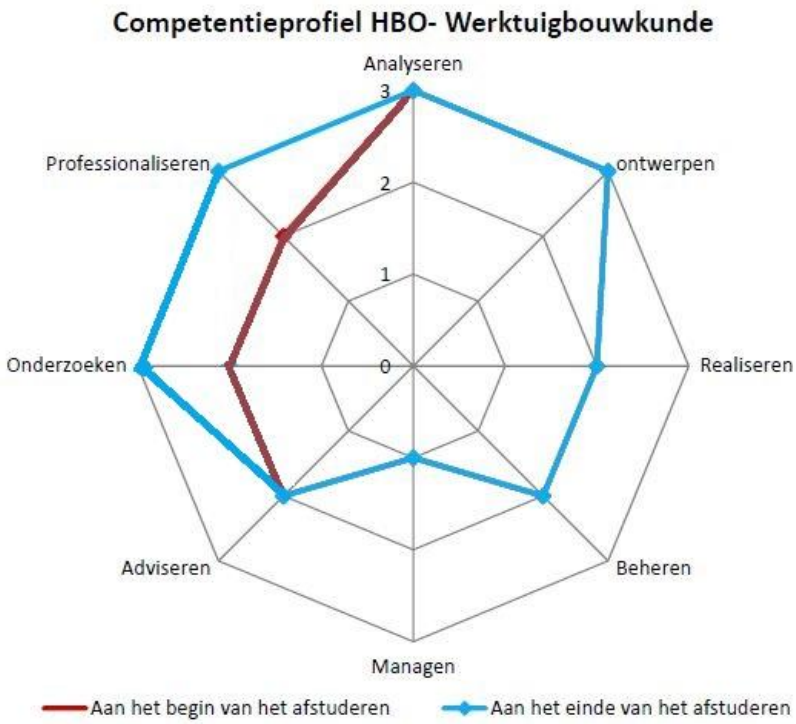
Tijdens het afstuderen is er hoofdzakelijk aan twee competenties gewerkt. Zowel op professioneel gebied als de onderzoeksvaardigheden zijn verder ontwikkeld en uitgebreid.

**Onderzoeken**

Tijdens het afstuderen is er een onderzoek uitgevoerd naar de demping van trillingen. De taak was om onderzoek te doen naar demping doormiddel van interne materiaalwrijving. Er moest kennis worden opgedaan op mechanisch gebied, materiaalkundig en op praktisch gebied over trillingdempers. Om dit onderzoek succesvol te kunnen uitvoeren zijn er een aantal vragen geformuleerd die beantwoord moesten worden. Vervolgens is er een literatuur onderzoek uitgevoerd. Aan de hand van deze informatie kan worden uitlegt hoe dit principe werkt. Dit literatuur onderzoek is uitgebreid met proefdata die is vergaard door zelfstandige experimenten. Met de kennis uit de literatuur is de data geïnterpreteerd en zijn conclusies getrokken. Hiermee is verder gewerkt.

**Professionaliseren**
Tijdens het afstuderen heeft er ook veel ontwikkeling plaats gevonden op professioneel gebied. Het onderzoek is uitvoert in opdracht van Bos Nieuwerkerk. Om een goed resultaat te krijgen is veel overlegt met specialisten op het gebied van schoorstenen en trillingdempers. Tijdens het ontwikkelen van de proefopstelling is ook regelmatig overlegt met mensen uit de productie. De feedback die daaruit naar boven is komen heeft veel bijgedragen aan het goed functioneren van de proefopstelling. Het contact met gespecialiseerde leverancier heeft er toe geleid dat er een haalbare toepassing is ontworpen.

Door het ontwikkelen van deze twee competenties is de spinnenwebdiagram veranderd. De competenties onderzoeken en professionaliseren zijn beide van niveau 2 naar niveau 3 ontwikkeld. De nieuwe diagram is te zien in figuur VII.2.



**Figuur VII.2. Competentieprofiel aan het eind van het afstuderen.**