

Ontwikkelen metselwerk CT3280 voor minor Bend and Break

Quin J. Lie-A-Fat

Ontwikkelen metselwerk CT3280 voor minor Bend and Break

Door

Quin Janel Lie-A-Fat

Begeleiders:

Dr. Ir. P.C.J. Hoogenboom

Dr. Ir.drs. C.R. Braam

Voorwoord

Voor mijn BSc-eindwerk heb ik onder leiding van dhr. Hoogenboom en dhr. Braam een project uitgevoerd waarbij ik verschillende proeven moest uitvoeren met metselwerk. Ik heb voor dit project gekozen omdat ik graag praktische ervaring wilde opdoen wat bij de uitvoering van dit project zeer zeker het geval was.

Hierbij wil ik mijn begeleiders en een ieder die mij op welke wijze dan ook geholpen heeft bij het uitvoeren van dit project van harte bedanken.

Delft, 26-11-2014

Quin Lie-A-Fat

Inhoudsopgave

Voorwoord	I
Inleiding.....	1
Probleemomschrijving	2
Experimenten	2
Ontwerp proefstukken en proefopstelling	2
Programma.....	2
Doelstelling	2
1 Experimenten	3
1.1 Wateropneming bakstenen	3
1.1.1 Hallergetal	3
1.1.2 Vrije wateropneming	4
1.2 Mortelsamenstelling.....	4
1.2.1 1 – minuut – hechtproef	4
1.2.2 10 - minuten – hechtproef	5
1.3 Buigtrekproef	5
1.4 Drukproef	5
1.5 Metselen	6
1.6 Muur bouwen	6
2 Proefopstellingen	7
2.1 Schudtafel.....	7
2.2 Shaker.....	8
2.3 Slingerproef	9
2.4 Meetinstrumenten	10
3 Uitgevoerde experimenten	11
3.1 Wateropneming bakstenen	11
3.1.1 Hallergetal	11
3.1.2 Vrije wateropneming	11
3.2 Mortelsamenstelling.....	11
3.3 Buigtrekproef	12
3.4 Drukproef	14
3.5 Muur.....	14
3.5.1 Bouwen.....	15
3.5.2 Voorspellen responsie	16

3.5.3	Werkelijke responsie	17
4	Interactive Physics	20
4.1	Schudtafel in IP	20
4.2	Shaker in IP	20
4.3	Slingerproef in IP	21
5	Minor Bend & Break	23
5.1	Programma	23
5.2	Nodig materiaal	24
6	Conclusies.....	25
Bijlage.....		26
1.	Eigenschappen muur bepalen	26
2.	Schudtafel.....	27
	Bewegingsvergelijking	27
3.	Shaker.....	29
	Bewegingsvergelijking	29
	Maximale kracht en uitwijking	30
4.	Buigtreksterkte metselwerk	32
5.	Versnelling.....	34
6.	Interactive Physics	34
Bronnen.....		37

Inleiding

Voor de minor Bend and Break moeten studenten verschillende projecten uitvoeren waarbij er proefstukken van beton, hout, metselwerk, staal en asfalt ontworpen, gebouwd en uiteindelijk beproefd worden.

Het project dat uitgevoerd moet worden met metselwerk wordt nauw verbonden met de vele aardbevingen die plaatsvinden in Groningen. Het gedrag en de bestendigheid van metselwerk ten opzichte van aardbevingen zal bepaald worden door middel van experimenten. De gebouwde proefstukken zullen met een soortgelijke frequentie als die van een aardbeving getrild worden. Het waargenomen gedrag en de verkregen data moeten daarna worden verwerkt in een eindrapport.

In dit BSc-eindwerk wordt het onderdeel metselwerk van de minor Bend and Break uitgebreid toegelicht.

Probleemomschrijving

Voor het onderdeel metselwerk van de minor Bend and Break moeten de studenten verschillende experimenten doen met bakstenen en metselspecie. Na deze experimenten gedaan te hebben, zal er een aantal proefstukken ontworpen, gebouwd en uiteindelijk beproefd worden. Na de data van deze proeven verwerkt te hebben, is er hopelijk genoeg kennis opgedaan over het gedrag en de aardbevingsbestendigheid van metselwerk, om bij te kunnen dragen aan het veiliger maken van gebouwen in Groningen. Dit alles moet gedaan worden binnen een aangegeven periode en volgens een vastgesteld programma.

Experimenten

Er is een aantal experimenten die gedaan kunnen worden. Deze moeten allemaal in kaart worden gebracht en worden beschreven.

Ontwerp proefstukken en proefopstelling

Met het ontwerp van de proefstukken en de manier van beproeven, kan verschillende kanten op worden gegaan. Het ontwerp van de proefstukken en de opstellingen waar de proefstukken uiteindelijk op beproefd zullen worden, moet bepaald en omschreven worden.

Programma

Het uitvoeren van de experimenten en het ontwerpen, bouwen en beproeven van de proefstukken moeten allemaal worden gedaan binnen een aangegeven periode. Het programma dat de studenten moeten volgen binnen deze periode moet samengesteld worden.

Het programma begint op 18 november 2014 en eindigt op 11 december 2014. De proefstukken worden uiteindelijk getest op 16 januari 2015.

Doelstelling

De doelstelling van dit BSc-eindwerk is het ontwikkelen van het vak metselwerk voor de minor Bend and Break. Dit betreft het schrijven van een programma, maken van een planning en het uitproberen van kritische onderdelen.

1 Experimenten

In dit hoofdstuk worden de experimenten omschreven die gedaan moeten worden met bakstenen en metselspecie. De verschillende experimenten worden gedaan zodat er inzicht, kennis en ervaring wordt opgedaan alvorens er wordt begonnen aan de bouw van de proefstukken.

1.1 Wateropneming bakstenen

De wateropneming van de bakstenen is belangrijk voor het bepalen van de samenstelling van de metselspecie en voor het bepalen of de bakstenen eventueel bevochtigd moeten worden. Voor het meten van de wateropneming van een baksteen zijn er verschillende methoden. De Initiële Wateropzuiging (IW-waarde) kan bepaald worden volgens richtlijnen in de Europese productnorm voor metselbaksteen : EN771-1. De Initiële Wateropzuiging van bakstenen geeft de hoeveelheid water weer die een volledig droge baksteen opneemt wanneer de zool van de baksteen tot 5 mm in het water ligt voor een periode van 60 seconden [1]. Hiermee kan de IW-waarde bepaald worden. Met de IW-waarde kan de baksteen geclassificeerd worden als slecht zuigend (IW1), matig zuigend (IW2), normaal zuigend (IW3) en sterk zuigend (IW4). De metselspecie kan vervolgens aan de hand van de classificatie van de bakstenen samengesteld worden.

Om de IW-waarden volgens de norm te bepalen, moet echter aan hele strenge eisen voldaan worden. In de praktijk wordt wateropneming uitgedrukt in het “Hallergetal” en de Vrijwillige Wateropname.

1.1.1 Hallergetal

In de praktijk wordt het “Hallergetal” gebruikt om de wateropneming aan te geven. Hierbij wordt de wateropneming van bakstenen bepaald die reeds een actuele vochtgehalte hebben. Als classificatie naar Hallergetal worden bakstenen geclassificeerd als:

- zwak zuigend: bakstenen met een Hallergetal $< 25 \text{ [gr/(dm}^3 \cdot \text{min)]}$
- matig zuigend: bakstenen met een Hallergetal tussen $10 - 25 \text{ [gr/(dm}^3 \cdot \text{min)]}$
- sterk zuigend: bakstenen met een Hallergetal $> 25 \text{ [gr/(dm}^3 \cdot \text{min)]}$ [2]

De werkwijze voor het bepalen van het Hallergetal [1]:

- Voorzie de bakstenen van een merkteken met een viltstift
- Meet en noteer de lengte, breedte en dikte van elke baksteen [m]
- Bereken het oppervlak van het legvlak (zool) [m^2]
- Weeg de (gedroogde) stenen en noteer : G_d (gewicht droog) [kg]
- Leg afstandhouders in de bak zodanig dat daarop een steen op zijn platte zijde past
- Giet water in de bak tot circa 4 mm boven de afstandhouder
- Leg de steen voor 60 seconden op de afstandhouder
- Haal de steen hierna uit het water en dep aanhangend water af met een vochtige doek
- Weeg de steen en noteer : G_w (gewicht nat) [kg]
- Bereken : $G_n - G_d = \text{wateropneming}$ [kg]
- Wateropneming delen door oppervlak geeft: Initiële Wateropzuiging = $(G_n - G_d)/\text{opp}$ [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$]

Volgens de norm moeten 10 bakstenen beproefd worden om een voldoende betrouwbaar gemiddeld resultaat en spreiding informatie te krijgen.

1.1.2 Vrije wateropneming

Als vervolg op de proef voor het bepalen van het Hallergetal kan de Vrijwillige Wateropneming bepaald worden. Voor de proef moet de baksteen tot 5 mm onder de bovenkant van de steen voor 24 uur onder water staan. Vervolgens moet er water bijgevuld worden tot 10 mm boven de bovenkant van de steen. Na nog 24 uur hierin te hebben gestaan, moeten de stenen afgedroogd en gewogen worden (G_{n2}). De Vrijwillige Wateropneming (VW) wordt dan bepaald door de wateropneming te delen door het totale volume van de baksteen [1].

De werkwijze voor het bepalen van de vrije wateropneming [1]:

- Vul de bak met water tot circa 5 mm onder de bovenkant van de baksteen
- Leg de stenen op afstandhouders in de bak en noteer het tijdstip
- Na 24 uur moet de bak bijgevuld worden tot circa 10 mm boven de bovenkant van de bakstenen
- Haal de stenen na 24 uur uit de bak en dep aanhangend water af met een vochtige doek
- Weeg de steen en noteer : G_{n2} [kg]
- Bereken het volume van een baksteen [dm^3]
- Bereken : $G_{n2} - G_d$ [kg]
- De Vrijwillige Wateropneming (VW) in volume % is dan : $VW = ([G_{n2} - G_d]/V) * 100\%$

1.2 Mortelsamenstelling

De mortelsamenstelling, de verhouding tussen zand, bindmiddel (kalk en/of cement) en water, is heel belangrijk voor een goede hechting tussen het mortel en de baksteen. Cement dient als het belangrijkste bindmiddel waaraan kalk wordt toegevoegd zodat het mortel een betere verwerkbaarheid krijgt en het zand dient als matrix [3]. Het vochttransport tussen specie en baksteen heeft invloed op de sterkte van de hechting. Indien het water snel uit de specie gezogen wordt door sterk zuigende bakstenen of door een te laag watergehalte in de specie, verstijft de specie te snel en kan de baksteen moeilijk goed geplaatst worden [4]. Een andere mogelijkheid is dat er te weinig water uit de specie wordt gezogen door de baksteen. Dit kan veroorzaakt worden door zwak zuigende bakstenen of door een te hoog watergehalte in de specie. Het gevolg hiervan is dat het langer duurt voordat de specie verstijft waardoor het risico ontstaat op “drijven” van de baksteen terwijl er verder wordt gemetseld [4]. Voor zwak tot normaal zuigende stenen kan de verhouding 1 : 0,5 : 4,5 worden gebruikt. Voor sterk zuigende stenen kan met een verhouding van ongeveer 1 : 1 : 6 worden gewerkt [2].

1.2.1 1 – minuut – hechtproef

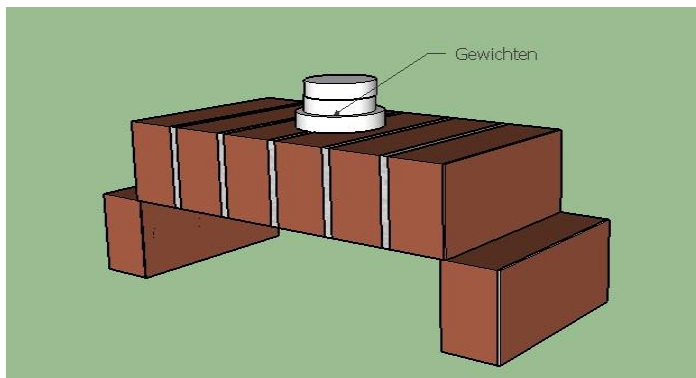
Met de 1 – minuut – hechtproef kan bepaald worden of de mortelsamenstelling goed is. Voor deze proef zijn 2 bakstenen nodig en een kleine hoeveelheid specie. De specie moet verspreid worden op één steen. Vervolgens moet de tweede steen in de specie worden gewreven. Laat dit voor 1 minuut staan en trek de twee stenen vervolgens uit elkaar. De mortelsamenstelling is goed als er aan beide bakstenen specie is blijven kleven. Als dit niet het geval is moet de mortelsamenstelling aangepast worden totdat de proef succesvol verloopt [1].

1.2.2 10 - minuten – hechtproef

Als vervolg op de 1 – minuut – hechtproef kan de 10 – minuten – hechtproef gedaan worden. Hierbij moet de specie op één steen verspreid worden waarna de tweede steen hierin gewreven wordt. Na 10 minuten te hebben gestaan, moet het proefstuk aan de bovenste steen worden opgetild. Als de tweede steen blijft hangen, is de specie goed. Indien dit niet het geval is, moet de mortelsamenstelling aangepast worden totdat de proef succesvol verloopt [1].

1.3 Buigtrekproef

Om de buigtreksterkte te bepalen van metselwerk moet er een proefstuk gemaakt worden van 6 verticaal op elkaar gestapelde bakstenen. De bakstenen moeten bij het metselen recht boven elkaar geplaatst worden. Na de bakstenen op elkaar te hebben gemetseld moet het proefstuk harden. Dit proefstuk zal horizontaal gelegd worden op twee bakstenen zoals aangegeven in Figuur 1, waarna er steeds gewichten op zullen worden gezet totdat hij bezwijkt. De zakking in het midden van het proefstuk kan gemeten worden met een meetklokje. Met de verkregen waarden voor de zakking en de maximale belasting kan de buigtreksterkte van het proefstuk bepaald worden.

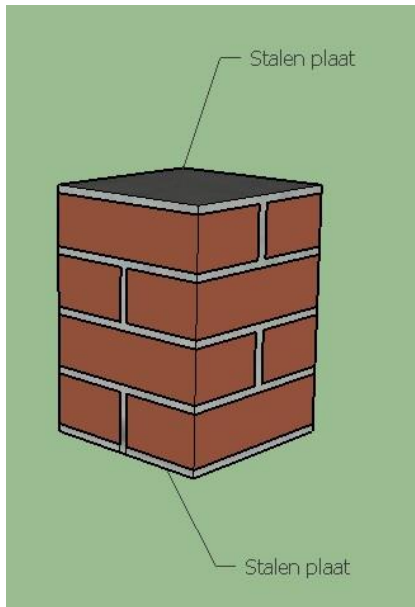


Figuur 1 – proefstuk voor buigtrekproef

1.4 Drukproef

Om de eigenschappen van de te bouwen proefstukken te kunnen schatten, moeten de studenten een drukproef uitvoeren. Per groep moet er een proefstuk gemaakt worden waarbij 8 bakstenen kruiselings op elkaar gemetseld worden (Figuur 2). Aan de boven- en onderkant van dit proefstuk moet een staalplaat gemetseld worden. Deze platen moeten ervoor zorgen dat bij het bezwijken van het proefstuk de boven- en onderkant vlak blijven, zodat er geen piekbelastingen veroorzaakt worden op het proefstuk. De platen moeten zo horizontaal mogelijk zitten zodat tijdens de drukproef de spanning over het gehele oppervlak opgenomen wordt.

De grootte van de belasting op het proefstuk en de vervorming die hierdoor veroorzaakt wordt, moeten bij het beproeven gemeten worden. Met deze waarden kan de elasticiteitsmodulus van metselwerk worden uitgerekend. Deze E-modulus zal nodig zijn bij het ontwerpen van de te metselen muur, in het vervolg van het vak metselwerk.



Figuur 2 - Proefstuk voor drukproef

1.5 Metselen

Om ervaring op te doen met het metselen van een muur moet er, na instructies en onder toezicht van een specialist op het gebied van metselen, een laag bakstenen gemetseld worden. De bakstenen moeten allemaal zo nauwkeurig mogelijk op een rechte lijn en op één hoogte geplaatst worden.

1.6 Muur bouwen

Als laatste experiment van het vak metselwerk moet er een muur van 1500mmx1500mm gemetseld worden. Deze muur moet een opening hebben van 400 mm². De vorm van de opening en de plek waar deze in de muur komt mag zelf bepaald worden. Afhankelijk van waar de opening geplaatst wordt, zullen de eigenschappen van de muur zoals de stijfheid en de eigenfrequentie, beïnvloed worden. Deze eigenschappen moeten in de ontwerpfase bepaald worden. Aan de hand van de gevonden waarden kan voorspeld worden onder welke opgelegde belasting de gebouwde muur zal bezwijken.

Nadat het ontwerp van de muur af is, moet het formeel voor de opening getimmerd worden. Als dit af is, moeten de bouwplaats gereed gemaakt en de profielen gesteld worden. Vervolgens kan de muur gemetseld worden.

2 Proefopstellingen

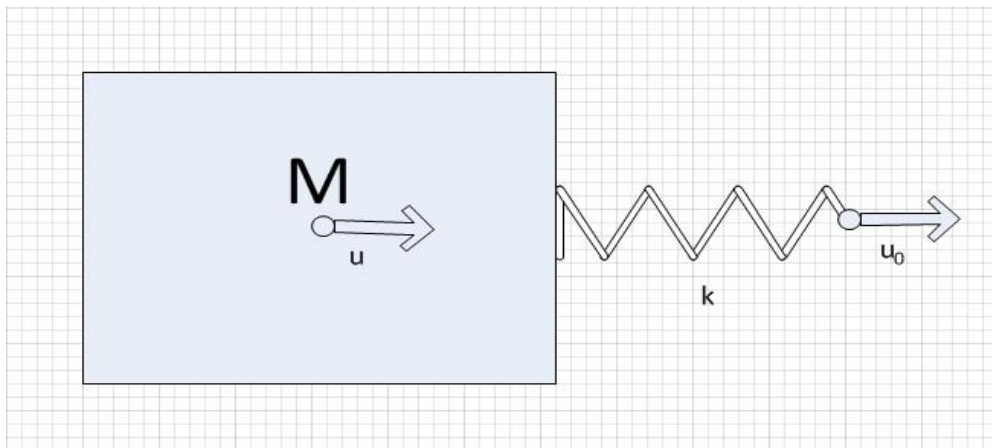
Om kennis op te doen over het gedrag van metselwerk tijdens een aardbeving moeten de gebouwde muurtjes met een soortgelijke belasting als die van een aardbeving, belast worden. Voor het simuleren van een aardbeving kunnen verschillende proefopstellingen gebruikt worden. Indien deze proefopstellingen niet beschikbaar zijn, kan het proefstuk beproefd worden door er simpelweg een klap aan te geven en de gevolgen hiervan te bestuderen.

Al de opstellingen die eventueel gebruikt kunnen worden, worden in dit hoofdstuk verder toegelicht.

2.1 Schudtafel

Een mogelijke opstelling waarop de gebouwde muurtjes beproefd kunnen worden, is de schudtafel. Bij het beproeven kan er een bepaalde belasting op de muurtjes gezet worden. Deze belasting moet dan als de boven belasting (voorbeeld: vloer) dienen die werkt op het metselwerk in gebouwen. De schudtafel kan geschematiseerd worden als een massa-veersysteem zoals aangegeven in Figuur 3.

De stijfheid (k) van het te beproeven muurtje moet vooraf bepaald worden (bijlage 1). Met deze waarde voor de stijfheid kan een schatting gemaakt worden bij welke amplitude en bij welke frequentie het muurtje zal bezwijken. Als de frequentie van de belasting waarmee het muurtje getrild wordt, de eigenfrequentie van het muurtje benadert, zal resonantie optreden. Resonantie is ontoelaatbaar voor constructies en het muurtje zal dus bezwijken als die optreedt.



Figuur 3 - schudtafel geschematiseerd als massa-veersysteem

De belasting (excitatie) die door de schudtafel veroorzaakt wordt op de muur, wordt beschouwd als een cosinusvormig verlopende kracht. Deze kracht wordt aangegeven met:

$$U_0 = \hat{u}_0 \cos(\omega t)$$

Om de responsie van de muur ten opzichte van de belasting te bepalen moet de bewegingsvergelijking van het systeem worden opgesteld (zie bijlage 2). De opgestelde bewegingsvergelijking luidt:

$$M\ddot{u} + c\dot{u} + ku = kU_0$$

$$M\ddot{u} + c\dot{u} + ku = k\hat{u}_0 \cos(\omega t)$$

Elk systeem kan bewegen volgens eigenbewegingen of gedwongen bewegingen. Eigenbewegingen zijn bewegingen van een systeem die mogelijk zijn zonder dat er van buitenaf vermogen aan het systeem geleverd wordt. Indien er wel van buitenaf vermogen aan het systeem geleverd wordt, wordt er gesproken van gedwongen bewegingen [5].

Voor systemen met damping neemt de eigenbeweging geleidelijk af totdat alleen de gedwongen beweging aanwezig is. Indien alleen de gedwongen beweging aanwezig is, wordt er gesproken van een steady-state response [5]. Voor het bepalen van de responsie van de schudtafel wordt alleen gekeken naar de steady-state response. Voor het bepalen van de steady-state response moet de particuliere oplossing van de bewegingsvergelijking bepaald worden. Deze particuliere oplossing luidt:

$$U_p = U_c * \cos(\omega t) + U_s * \sin(\omega t)$$

Als oplossing van deze particuliere oplossing volgt:

$$U_{steady} = \frac{\sqrt{k^2 \hat{u}_0^2}}{\sqrt{M^2 \omega^4 - 2Mk\omega^2 + c^2 \omega^2 + k^2}}$$

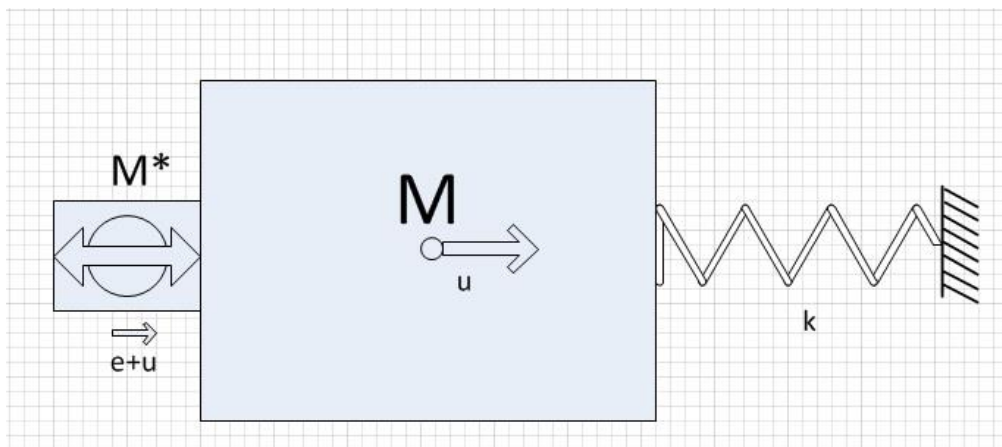
Deze oplossing kan herschreven worden tot:

$$\frac{U_{steady}}{\hat{u}_0} = \frac{k}{\sqrt{M^2 \omega^4 - 2Mk\omega^2 + c^2 \omega^2 + k^2}}$$

Deze vergelijking geeft het verloop van de amplitude aan als functie van de hoekfrequentie en wordt de frequentie-responsie functie genoemd.

2.2 Shaker

Voor het beproeven van de muur kan ook een shaker gebruikt worden. De shaker kan op de muur geplaatst worden om zodoende trillingen in de muur te veroorzaken. Deze opstelling kan geschematiseerd worden als een massa-veersysteem zoals aangegeven in Figuur 4. De frequentie en de amplitude kunnen door middel van een functiegenerator, die de shaker aanstuurt, bepaald worden.



Figuur 4 - Shaker geschematiseerd als massa-veersysteem

De belasting (excitatie) die door de shaker veroorzaakt wordt op de muur, wordt beschouwd als een cosinusvormig verloopende kracht. Deze excitatie wordt aangegeven met:

$$e = \hat{e}_0 \cos(\omega t)$$

Om de responsie van de muur ten opzichte van de belasting te bepalen, moet de bewegingsvergelijking van het systeem worden opgesteld (zie bijlage 3). De opgestelde bewegingsvergelijking luidt:

$$(M + M_{shaker})\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -M_{shaker}\ddot{e}$$

$$(M + M_{shaker})\ddot{u} + c\dot{u} + ku = M_{shaker}\hat{e}_0\omega^2 \cos(\omega t)$$

Ook bij dit systeem wordt alleen gekeken naar de steady-state response van het systeem. Hiervoor moet wederom de particuliere oplossing gezocht worden. Deze particuliere oplossing luidt:

$$Up = Uc * \cos(\omega t) + Us * \sin(\omega t)$$

Als oplossing van deze particuliere oplossing volgt:

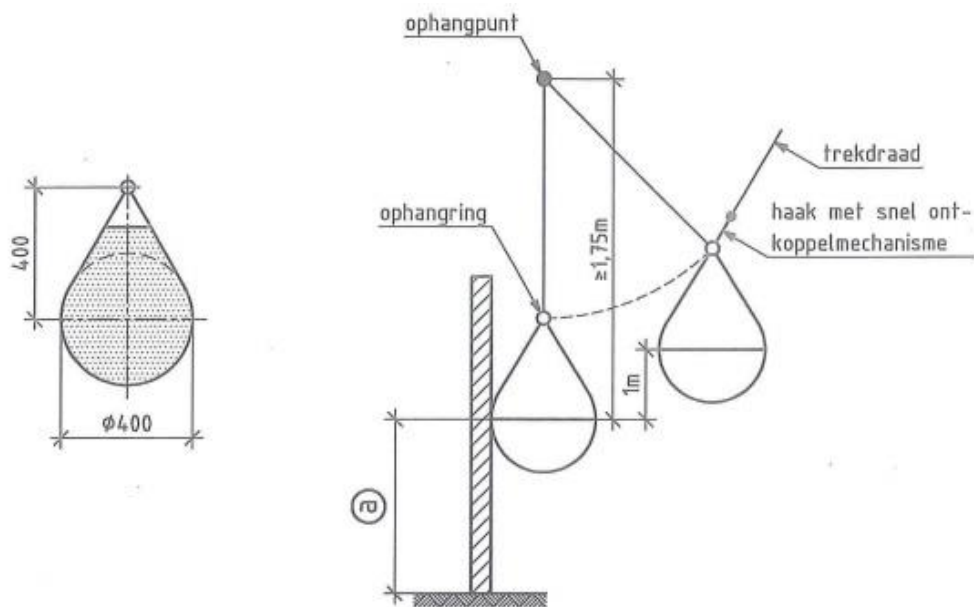
$$U_{steady} = \frac{\sqrt{M_{shaker}^2 \omega^4 \hat{e}_0^2}}{\sqrt{M^2 \omega^4 + 2M_{shaker} M \omega^4 + M_{shaker}^2 \omega^4 - 2Mk\omega^2 - 2M_{shaker} k\omega^2 + c^2 \omega^2 + k^2}}$$

Deze oplossing kan herschreven worden tot:

$$\frac{U_{steady}}{\hat{e}_0} = \frac{\sqrt{M_{shaker}^2 \omega^4}}{\sqrt{M^2 \omega^4 + 2M_{shaker} M \omega^4 + M_{shaker}^2 \omega^4 - 2Mk\omega^2 - 2M_{shaker} k\omega^2 + c^2 \omega^2 + k^2}}$$

2.3 Slingerproef

De slingerproef kan gedaan worden indien het muurtje beproefd moet worden door er éénmalig een klap aan te geven. Het muurtje moet weerstand kunnen bieden tegen de stootbelasting die veroorzaakt wordt door de geslingerde zak. De slingerproef wordt omschreven in artikel 9.6 van NEN 6702. Om deze proef te kunnen doen, moet de muur zijn ingeklemd zodat deze niet omvalt. Bij de beproeving wordt een zacht stootlichaam (leren zak), vanaf een bepaalde voorgeschreven hoogte, tegen de muur aan geslingerd. Het stootlichaam is een leren zak gevuld met glaskogeltjes met een totale massa van 50 kg. De glaskogeltjes hebben een middenlijn van 3 mm. De verticale afstand tussen het ophangpunt en het aanstootpunt moet ten minste 1,75 m zijn. Verder moet de beginuitwijking van het stootlichaam tenminste 1 m boven het gekozen aanstootpunt liggen. Een voorbeeld van de opstelling wordt aangegeven in Figuur 5. De stootbelasting kan beschouwd worden als een vrije horizontale belasting die aangrijpt op een cirkelvormig oppervlak met een middellijn van 0.2 m [6].



a hoogte van het aanstootpunt boven het vloerniveau

Figuur 5 - slingerproef [6]

2.4 Meetinstrumenten

Bij elk van de bovengenoemde opstellingen moet er, om data te verkrijgen bij het beproeven van de muur, een aantal meetinstrumenten gebruikt worden. Voor het meten van de eigenfrequentie van de muur wordt er gebruik gemaakt van een 3-assige versnellingsmeter. Deze versnellingsmeter kan de versnelling op een bepaald punt in 3 verschillende richtingen meten. De opgemeten data van de versnellingsmeter worden verstuurd naar een AD-converter (analoog-digitaalomzetter) dat de signalen vertaalt en doorstuurt naar een computer [7]. Op de computer moet een software geïnstalleerd worden waarin de meetgegevens verder verwerkt kunnen worden.

3 Uitgevoerde experimenten

Om ervaring op te doen met het metselen en om te kunnen bepalen wat er allemaal nodig is voor het uitvoeren van de experimenten, zijn de experimenten zelf uitgevoerd. Hierbij kon de tijd die nodig is voor het uitvoeren van de experimenten ook bepaald worden zodat het programma voor de minor Bend and Break hierop kon worden afgestemd.

3.1 Wateropneming bakstenen

Voor het bepalen van de wateropneming van de te gebruiken bakstenen zijn het Hallergetal en de vrije wateropneming van de bakstenen bepaald.

3.1.1 Hallergetal

Het bepalen van het Hallergetal kan, indien alle benodigde spullen gereed staan, makkelijk binnen 15 minuten gedaan worden. De voor het Hallergetal bepaalde waarden worden in Tabel 1 aangegeven. Aan de hand van deze waarden kan geconcludeerd worden dat deze bakstenen geclassificeerd kunnen worden als sterk zuigende bakstenen.

Baksteen #	Gd [g]	Gn [g]	A= L*b [dm ²]	Hallergetal (Gn-Gd)/A [gr/dm ² .min]
1	1804.2	1902.8	2.10*1.01 =2.121	98.6/2.121=46.488
2	1811.5	1896.1	2.12*1.03=2.1836	84.6/2.184=38.736

Tabel 1 - Bepalen Hallergetal

3.1.2 Vrije wateropneming

Het bepalen van de vrije wateropneming van een baksteen geschiedt over 2 dagen. Dit omdat de stenen 2 keer voor 24 uur in water moeten staan. Per dag hoeft er echter maar 5-10 minuten aan besteed te worden. De waarden voor de vrije wateropneming van de bakstenen worden in Tabel 2 aangegeven.

Baksteen #	Gd [kg]	Gn2 [kg]	V= L*b*h [dm ³]	VW-waarde = ([Gn2-Gd]/V)*100%
1	1.8115	2.0844	2.12*1.03*0.49=1.07	(0.2729/1.07)*100%=25.50%

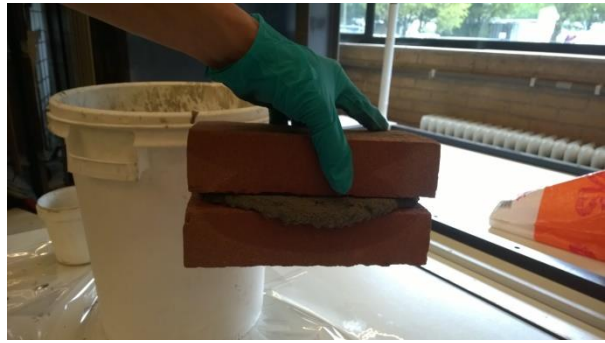
Tabel 2 - Bepalen vrije wateropneming

3.2 Mortelsamenstelling

Om ervaring op te doen met het samenstellen van de specie zijn de 1-minuut en de 10-minuten hechtproef uitgevoerd.

Voordat de 1-minuut hechtproef gedaan kan worden, moet de specie aangemaakt worden. Als verhouding tussen cement, kalk en zand is gebruikt 1 : 1 : 5. Het water wordt in kleine hoeveelheden toegevoegd totdat de metselspecie een goede verwerkbaarheid heeft. Het zand, cement en de kalk worden samengevoegd en gemengd voordat het water erbij gezet wordt. Als de specie gemaakt is, kan de proef uitgevoerd worden. Voor het succesvol uitvoeren van de 1-minuut hechtproef waren 3 pogingen nodig. De samenstelling van de specie werd steeds aangepast tot de proef succesvol verliep.

Na de 1-minuut hechtproef is de 10-minuut hechtproef gedaan. Deze verliep de eerste keer al succesvol en was dus snel gedaan. Het resultaat van beide proeven wordt weergegeven in Figuur 6



Figuur 6 - 1-minuut en 10-minuut hechtproef

3.3 Buigtrekproef

Bij het proefstuk waarmee de buigtrekproef gedaan moet worden moeten de 6 bakstenen zo recht als mogelijk op elkaar gemetseld worden. Om de bakstenen recht boven elkaar te krijgen, zijn ze tegen een houten profiel gemetseld zoals aangegeven in Figuur 7. Voordat er begonnen wordt met metselen, moet de gemiddelde hoogte van de bakstenen bepaald worden. Voor de dikte van de laag specie kan ongeveer 10 mm aangehouden worden. Op een houten meetlat kan, door de gemiddelde hoogte van de stenen en de dikte van de laag specie op te tellen, aangegeven worden tot welke hoogte elke steen moet komen. Deze waarden kunnen vervolgens aangegeven worden op het profiel waartegen het proefstuk gebouwd zal worden. Op deze manier kunnen de bakstenen makkelijker op de juiste plek geplaatst worden. Het proefstuk wordt nu echter in één richting gesteund. Om er toch voor te zorgen dat de bakstenen recht boven elkaar zitten, is bij het plaatsen van elke steen steeds een waterpas ernaast gehouden om te helpen de juiste plek te bepalen. Voor het bouwen van dit proefstuk is ongeveer één uur nodig indien al de nodige spullen gereed staan. Het gebouwde proefstuk is weergegeven in Figuur 8.



Figuur 7 – Opstelling proefstuk buigtrekproef



Figuur 8 – Proefstuk buigtrekproef

Dit proefstuk is gebouwd op maandag 6 oktober '14 en is beproefd op dinsdag 18 november '14.

Voordat het proefstuk beproefd kon worden zijn bij het optillen 2 bakstenen losgeraakt. De proef is vervolgens uitgevoerd met 4 op elkaar gestapelde bakstenen. Bij het beproeven wordt het proefstuk horizontaal gelegd op 2 steunpunten (bakstenen). Om de spanning zoveel mogelijk over het gehele contactoppervlak te verdelen is er plastic foam op de randen van de steunpunten geplakt. Om de zakking in het midden van het proefstuk te meten is er een meetklokje boven het proefstuk gemonteerd (Figuur 9).



Figuur 9 - Meetklokje, gewichten en steunpunten met daarop plastic foam geplakt

Na het proefstuk op de steunpunten gelegd te hebben zijn er steeds gewichtjes geplaatst in het midden van het proefstuk totdat deze uiteindelijk is bezweken. Het maximale gewicht dat gedragen kon worden is 7 kg. Aan de hand van de verkregen waarden uit deze proef is de buigtreksterkte van metselwerk bepaald (bijlage 4). Voor de buigtreksterkte volgt:

$$f_m = \frac{M_{\max} z}{I_{zz}}$$

$$M_{\max} = 6.4903 \cdot 10^{-3} \text{ kNm}$$

$$z = 0.0505 \text{ m}$$

$$I_{zz} = 18.0303 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$f_m = 18.178 \text{ kN} / \text{m}^2 = 0.0182 \text{ N} / \text{mm}^2$$

De zakking in het midden van het proefstuk is ook gemeten tijdens het uitvoeren van de proef. Deze zakking wordt veroorzaakt door het eigengewicht en door de extra belasting van de gewichten (7 kg). De maximale zakking die is opgemeten bedraagt 0.15 mm. Aan de hand van deze waarde kan met vergeet-mij-nietjes voor zakking de elasticiteitsmodulus bepaald worden. Voor de totale zakking in het midden van het proefstuk geldt:

$$w = w_q + w_F = 0.15 \text{ mm}$$

Na het substitueren van de vergeet-mij-nietjes (bijlage 4) volgt voor de E-modulus:

$$E = 18.08 N / mm^2$$

3.4 Drukproef

Om de E-modulus van metselwerk te kunnen bepalen, is het proefstuk gebouwd waarop de drukproef gedaan kan worden (Figuur 11). Hiervoor moeten 8 bakstenen kruiselings op elkaar gemetseld worden met aan de boven- en onderkant een stalen plaat om het oppervlak zo vlak als mogelijk te maken. Voor het proefstuk dat gebouwd is, waren de stalen platen niet beschikbaar. Om toch voor een redelijk vlak oppervlak te zorgen zijn er houten plankjes gebruikt om de specie aan de boven- en onderkant van het proefstuk vlak te maken. Verder zijn als hulp bij het plaatsen van de bakstenen houten plankjes gebruikt waarop de verschillende hoogten, waarop de stenen geplaatst moeten worden, zijn aangegeven (Figuur 10) .



Figuur 10- Opstelling proefstuk voor drukproef



Figuur 11 - Proefstuk voor drukproef

Tijdens het bouwen van dit proefstuk was het tot twee keer toe nodig om extra specie te maken. Dit heeft ervoor gezorgd dat het wat langer duurde voordat het proefstuk gebouwd was. Aangezien specie snel gebruikt moet worden vanwege het afnemen van de verwerkbaarheid, is het toch niet aangeraden heel veel specie in één keer te maken. Bij elkaar heeft het bouwen van dit proefstuk ongeveer 2 uren geduurd.

Dit proefstuk is gebouwd op donderdag 9 oktober '14.

3.5 Muur

Er is een muur gebouwd om een beeld te krijgen van het aantal werkdagen en de materialen die nodig zijn voor het bouwen van de muur. De afmeting van de gebouwde muur is 1000mmx1500 mm. In deze muur is er geen opening. Er zijn ook voorspellingen gedaan over de eigenfrequentie en de responsie van de muur ten opzichte van de verschillende belastingen.

3.5.1 Bouwen

Voordat de muur gebouwd wordt, moet de opstelling gemaakt worden waarin deze gebouwd zal worden. Voor de opstelling zijn er plankjes, profielen, schoren en een multiplexplaat beschikbaar. Met behulp van een boormachine, schroeven en waterpas kunnen de profielen op de juiste plek geplaatst en vastgeschroefd worden.

De verschillende hoogten waarop de bakstenen geplaatst moeten worden, worden op een houten lat aangegeven. Met deze houten lat kunnen deze hoogten makkelijk worden overgenomen op beide profielen. Voordat er begonnen wordt met metselen, wordt er metseltouw gespannen tussen de profielen. Dit touw moet de hoogte aangegeven tot waar de te metselen laag bakstenen moet komen. Het metseltouw wordt zodanig geplaatst dat er achter het touw gewerkt wordt. Na een laag bakstenen te hebben gemetseld, wordt het touw verplaatst naar de volgende hoogte.

Er is gemetseld in halfsteensverband waarbij elke laag steeds met een halve steen verspringt. Om steeds met een halve steen te kunnen verspringen moeten enkele stenen door het midden gehakt worden. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de sabel en de hamer. De steen wordt gehakt door de sabel op de plek te zetten waar de steen gehakt moet worden en hierop vervolgens te slaan met de hamer. Om nauwkeurig te hakken kan de steen na elke slag op de sabel een kwartslag omgedraaid worden zodat de scheur in de steen langzaam vanuit verschillende kanten gevormd wordt.

Bij het metselen wordt een hoeveelheid specie gelegd op de ondergrond (of onderliggende laag stenen) waarin de steen geplaatst moet worden. De steen wordt gewreven in de specie totdat deze op de juiste plek zit. Bij het plaatsen van de steen moet ervoor gezorgd worden dat er wat specie in stootvoeg terecht komt. Om te controleren of de steen recht geplaatst is wordt er een waterpas op gelegd.

Als de lagen gemetseld zijn, worden de voegen uitgekraabd tot een diepte van ongeveer 1 cm. Nadat het metselwerk enkele dagen is uitgehard kunnen de voegen met hiervoor aangemaakte voegspecie afgewerkt worden. De voegen moeten hierbij eerst schoongemaakt worden zodat al de specie resten verwijderd worden. De muur kan eventueel ook nat gemaakt worden om de hechting te verbeteren [8]. Met de voegspijker en het voegbord worden vervolgens de voegen afgewerkt. Na de voegen te hebben afgewerkt wordt de muur afgeveegd met een stoffer. De muur is hierna klaar (Figuur 12) en moet harden alvorens de verschillende experimenten uitgevoerd kunnen worden.



Figuur 12 - Gemetselde muur

3.5.2 Voorspellen responsie

Er moet voorspeld worden onder welke belasting deze muur zal bezwijken. Voor het beproeven van de muur zijn er drie verschillende proefopstellingen beschikbaar. Elk van deze opstellingen veroorzaakt een andere belasting op de muur. Om deze berekeningen (voorspellingen) te kunnen maken, moeten enkele eigenschappen van de muur bepaald worden. De massa (M), elasticiteitsmodulus (E), demping(ξ), stijfheid (k) en de eigenfrequentie (f_e) moeten bepaald worden. Enkele van deze worden aangenomen.

Aangenomen waarden:

$$E = 10000 \frac{N}{mm^2}$$

$$\xi = 2\%$$

De massa, stijfheid en eigenfrequentie volgen uit bijlage 1:

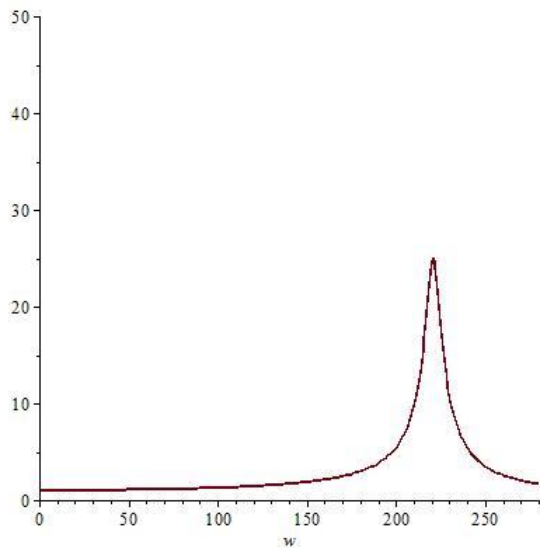
$$M = 150kg$$

$$k = 7324218N / m$$

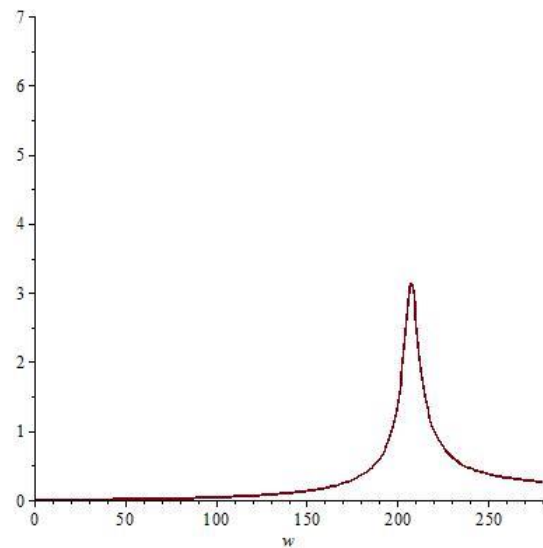
$$\omega_0 = 220.971$$

$$f_e = \frac{1}{2\pi} \omega_0 = 35.19$$

Deze waarden kunnen gesubstitueerd worden in de eerder bepaalde frequentie-responsie functies voor de schudtafel en de shaker. De voorspelde responsie voor de schudtafel is weergegeven in Figuur 13 en de voorspelde responsie voor de shaker is weergegeven in Figuur 14.



Figuur 13 - frequentie-responsie functie schudtafel



Figuur 14 - frequentie-responsie functie shaker

In geval de muur belast wordt door de shaker treedt er een horizontale belasting op aan de bovenkant van de muur. Om de spanningen in de muur te bepalen kan de muur geschematiseerd worden als een ingeklemde ligger. De horizontale belasting veroorzaakt een moment bij de inklemming. Door het moment ontstaan er druk en trekspanningen in het metselwerk. Voor de maximale trekspanning die kan worden opgenomen door het metselwerk wordt 3N/mm^2 aangenomen. Aan de hand van deze waarde kan de maximale kracht bepaald worden waarmee de muur horizontaal belast kan worden. Met deze kracht kan vervolgens de uitwijking die veroorzaakt wordt, bepaald worden (zie bijlage 3). Voor de maximale kracht geldt:

$$F_{\max} = 7500\text{N} = 7.5\text{kN}$$

Indien deze belasting optreedt zal er een uitwijking veroorzaakt worden van:

$$u = \frac{Fl^3}{3EI} = 2\text{mm}$$

Zoals eerder vermeld wordt de eigenfrequentie gemeten door gebruik te maken van een versnellingsmeter. Er zijn verschillende versnellingsmeters, met verschillende gevoeligheid beschikbaar, dus moet er een schatting gemaakt worden van de versnelling die verwacht kan worden. Uit de gemaakte berekening (bijlage 5) volgt een versnelling van:

$$a_{\max} = -48.828 \text{ m/s}^2$$

$$a_{\max} = \frac{-48.828}{9.81} = -4.977 \text{ g}$$

3.5.3 Werkelijke responsie

- De eigenfrequentie

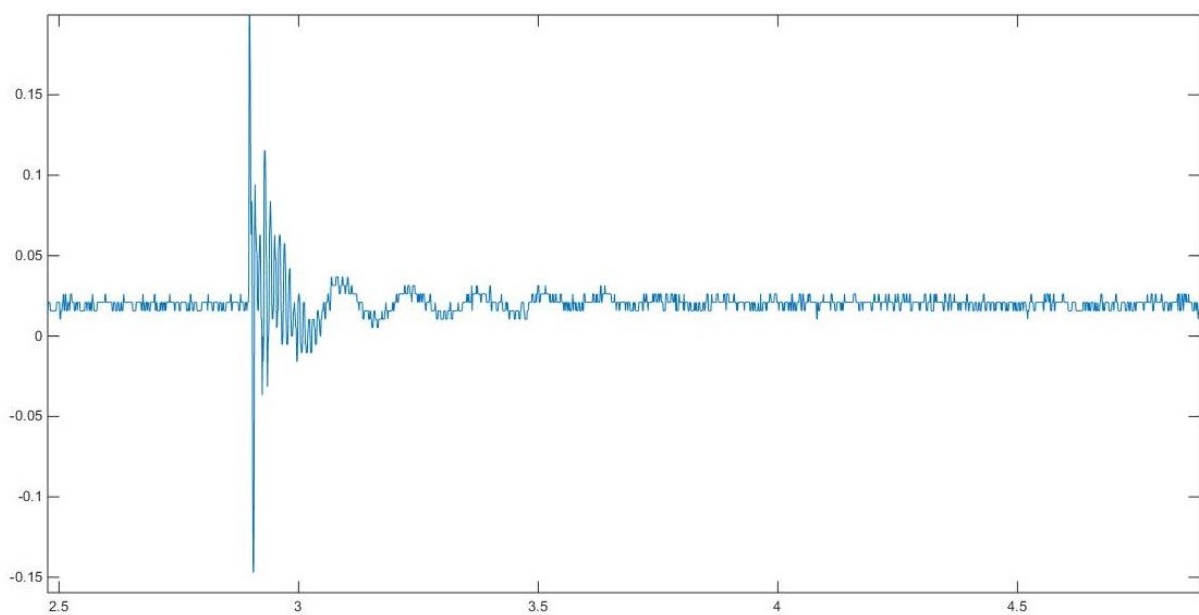
De eigenfrequentie van de muur is bepaald door de versnelling van de muur te meten nadat er een klap tegenaan is gegeven met een rubberen hamer. Om de versnelling te kunnen meten is de versnellingsmeter op de muur geplakt met knutselklei (Figuur 15). De meter is aangesloten op een AD-converter die de data op zijn beurt doorstuurt naar de laptop. De opgemeten data kan naar Microsoft Excel/matlab geëxporteerd worden om verder uitgewerkt te worden.



Figuur 15 - Opmeten versnelling

Uit het signaal dat verstuurd is naar de laptop (Figuur 16) kan de eigenfrequentie bepaald worden. Voor de eigenfrequentie uit dit signaal geldt:

$$f_e = 7.14$$



Figuur 16 - Signaal versnellingsmeter

Om de eigenfrequenties duidelijk af te kunnen lezen en vooral om verschillende pieken die mogelijk zijn opgenomen in de data hieruit te filteren, kunnen de opgemeten signalen benaderd worden met een fourier transformatie.

- De stijfheid

Voor het bepalen van de stijfheid (k) van de muur is er een horizontale kracht aangebracht bovenaan de muur. Deze kracht is aangebracht door te trekken aan een hangweegschaal. De verplaatsing die deze kracht veroorzaakt, is gemeten met een meetklokje zoals aangegeven in Figuur 17. De maximale kracht waarmee de muur belast kon worden, is 8 kg. Bij hogere belastingen is het aflezen op het meetklokje moeilijk vanwege trillingen die veroorzaakt worden bij het steeds harder trekken. Voor de stijfheid geldt:

$$k = \frac{F}{u}$$

Bij een kracht van 1 kg is een uitwijking gemeten van 0.11 mm en bij een kracht van 8 kg is een uitwijking gemeten van 0.85 mm. Door deze waarden in de vergelijking voor de stijfheid te substitueren volgt:

$$k_1 = \frac{1 \cdot 9.81}{0.11} = 89.18 \text{ N / mm}$$
$$k_2 = \frac{8 \cdot 9.81}{0.85} = 92.33 \text{ N / mm}$$



Figuur 17 - Stijfheid bepalen

4 Interactive Physics

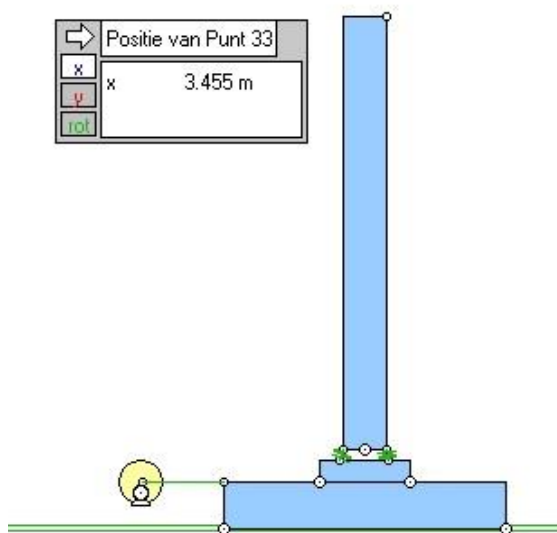
Interactive physics (IP) is een simulatiesoftware waarmee eenvoudige en complexe simulaties van natuurkundige verschijnselen gemaakt kunnen worden [9]. Het gedrag van de te bouwen muur ten opzichte van de verschillende belastingen kan met IP gesimuleerd worden.

Er wordt aangenomen dat de muur zal bezwijken op buiging. Om dit te simuleren in IP worden er twee veren aan de onderkant, waar het maximale moment optreedt, van de muur aangenomen die een stijfheid (k) hebben van:

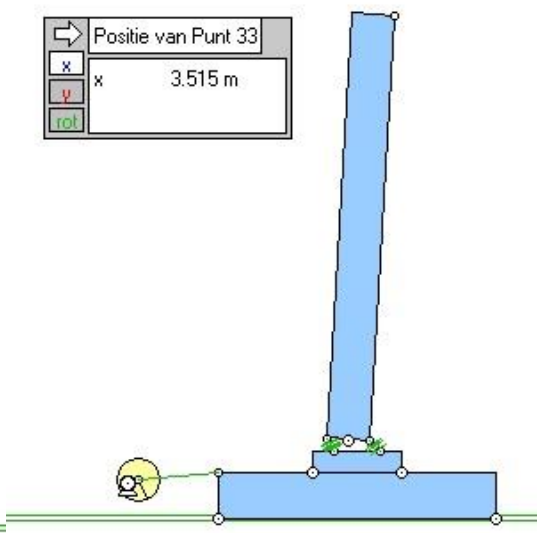
$$k = 1500000 \text{ N} / \text{mm} \text{ (zie bijlage 6)}$$

4.1 Schudtafel in IP

Voor het simuleren van de schudtafel is in IP de muur gebouwd op een plaat. De plaat is op rails gelegd zodat deze heen en weer verschoven kan worden. Om de plaat te laten verschuiven is deze gekoppeld aan een motor ("tool" in IP) die een excentrische massa laat roteren met een aangegeven snelheid. Tijdens het "runnen" kan vervolgens de maximale uitwijking van een aangegeven punt op de muur bepaald worden. In Figuur 19 wordt de maximale uitwijking aangegeven van het punt aan de rechter bovenhoek van de muur (punt 33). In rust is de positie van punt 33: 3.455 m (Figuur 18) en nadat de plaat in beweging komt zijn de uiterste waarden voor de uitwijking 3.409 m en 3.515 m.



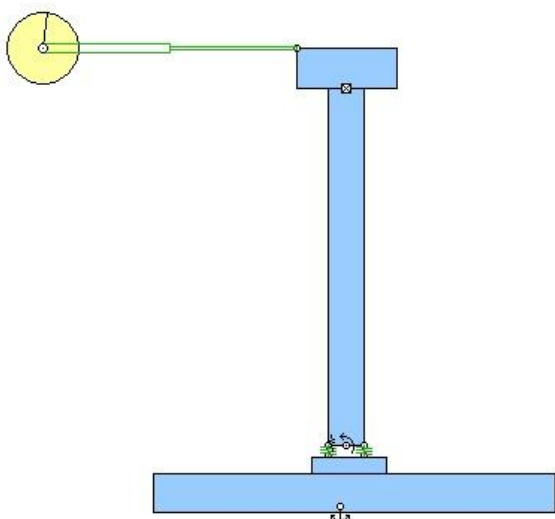
Figuur 18 – Schudtafel in rust



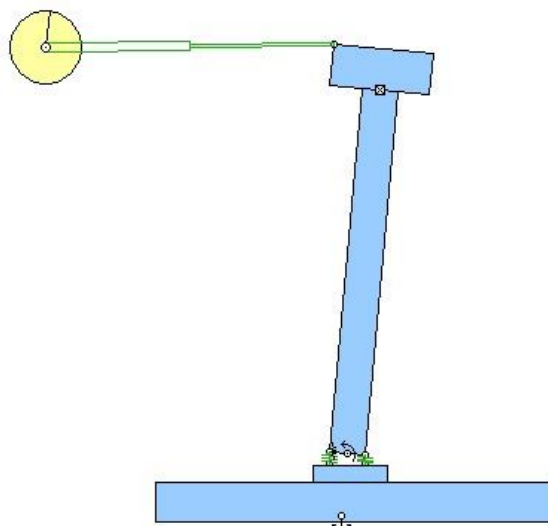
Figuur 19 – Schudtafel belast

4.2 Shaker in IP

Om de shaker te simuleren in IP is de muur wederom gebouwd op een plaat. De plaat kan in dit geval echter niet bewegen en zit dus "vast" aan de grond. Op de muur is er een massa gelegd die door middel van een actuator (tool in IP) harmonisch belast kan worden zoals aangegeven in Figuur 20 en 21. De uitwijking, snelheid, kracht etc. kunnen vervolgens aangegeven en/of gemeten worden.



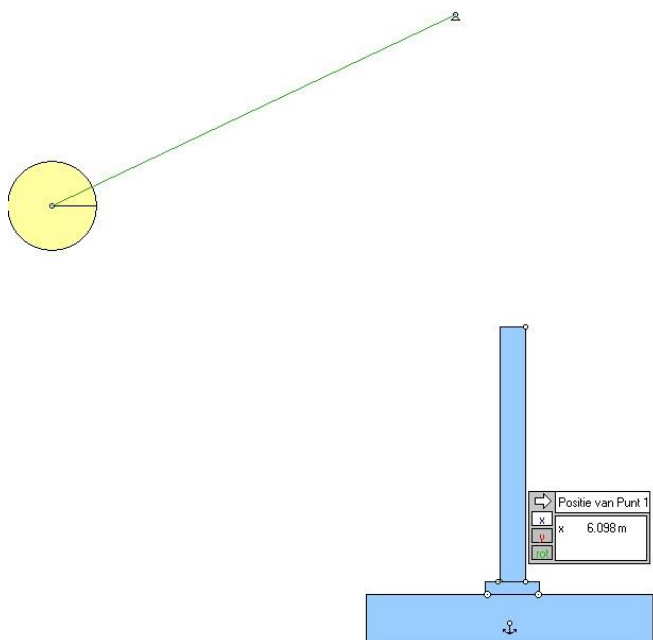
Figuur 20 – Shaker in rust



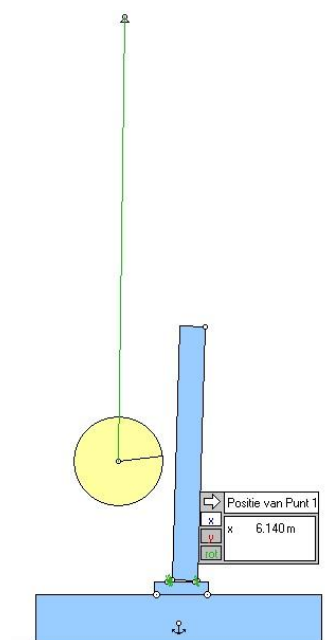
Figuur 21 – Shaker belast

4.3 Slingerproef in IP

Bij het uitvoeren van de slingerproef kan de muur op 2 manieren bezwijken. De muur kan in zijn geheel omkantelen of hij kan bezwijken op buiging. In Figuur 22 en 23 wordt het bezwijken op buiging gesimuleerd op identieke wijze als eerder is omschreven voor de schudtafel en de shaker.

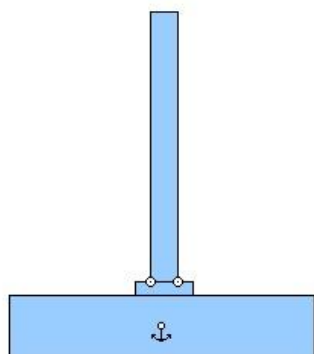
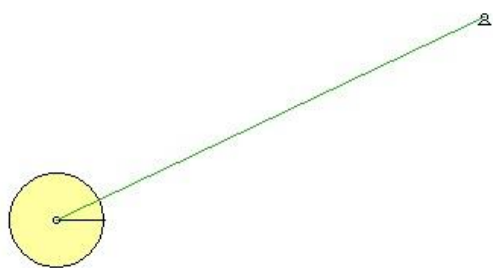


Figuur 22 - Slingerproef (in rust (scheurvorming))

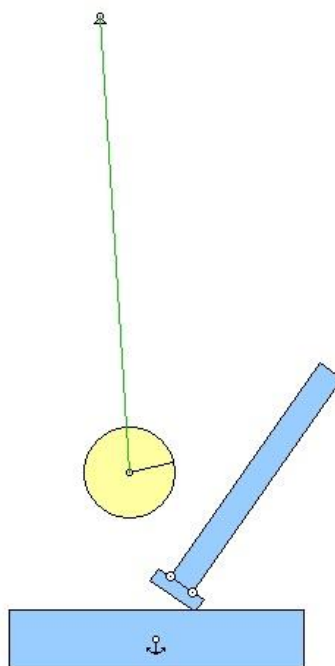


Figuur 23 - Slingerproef (belast (scheurvorming))

In Figuur 24 en 25 wordt het kantelen van de muur gesimuleerd. Zoals te zien is in Figuur 25 zal, indien de proef wordt uitgevoerd volgens de norm met een massa van 50 kg en indien de muur niet bezwijkt op buiging, de muur in zijn geheel omkantelen.



Figuur 24 - Slingerproef (in rust (omkantelen))



Figuur 25 - Slingerproef (belast (omkantelen))

5 Minor Bend & Break

Al de experimenten die gedaan en de colleges die gevolgd moeten worden voor het vak metselwerk, moeten ingepland worden op voor dit vak gereserveerde dagen tussen dinsdag 18 november en donderdag 11 december. Op 11 december moet het voorlopige rapport ingeleverd worden. Verder moet een schatting gemaakt worden van welke materialen er allemaal nodig zijn en in welke hoeveelheden deze nodig zijn.

5.1 Programma

Aan de hand van de tijd die nodig geacht wordt voor het uitvoeren van elk van de experimenten, is er een programma opgesteld. In dit programma is er zo goed als mogelijk invulling gegeven aan de beschikbare dagen. In totaal zijn er 15 werkmiddagen en 13 werkdagen waarop er colleges gevolgd of gewerkt kan worden. Voor het verzorgen van colleges worden 4 middagen gereserveerd. In de resterende werkdagen moeten de verschillende experimenten worden uitgevoerd. In Tabel 3 wordt het voorlopige schema aangegeven.

	Ochtend	Middag
Dinsdag 18 november	-	College* Hoogenboom
Woensdag 19 november	-	College* Hoogenboom
Maandag 24 november	Bepalen IW-waarde en VW-waarde Mortelsamenstelling bepalen	1 – minuut – hechtproef 10 - minuten – hechtproef Bouw proefstuk voor buigtrekproef
Dinsdag 25 november	Bepalen VW-waarde Bouw proefstuk voor drukproef	College Hoogenboom
Woensdag 26 november	Bepalen VW-waarde Proefstuk ontwerpen	College Welleman
Donderdag 27 november	Proefstuk ontwerpen	College Welleman
Vrijdag 28 november	Proefstuk ontwerpen	Proefstuk ontwerpen
Maandag 1 december	Proefstuk ontwerpen	Proefstuk ontwerpen
Dinsdag 2 december	Proefstuk ontwerpen	Demonstratie ervaren metselaar
Woensdag 3 december	Formeel timmeren Profielen stellen	Formeel timmeren Profielen stellen
Donderdag 4 december	Muur bouwen	Buigtrekstrekte bepalen Druksterkte bepalen Stevin 2
Vrijdag 5 december	Muur bouwen	Muur bouwen
Maandag 8 december	Muur bouwen	Muur bouwen
Dinsdag 9 december	Rapport schrijven	Rapport schrijven

Woensdag 10 december	Rapport schrijven	-
Donderdag 11 december	Voorlopige berekening sterkte metselwerk proefstuk inleveren	
Vrijdag 16 januari	Metselwerk beproeven	

Tabel 3 – Programma

5.2 Nodig materiaal

De nodige materialen voor het uitvoeren van de verschillende experimenten met de bakstenen en de metselspecie zijn in Tabel 4 aangegeven.

	Nodig materiaal
Wateropneming bakstenen	Bakstenen, weegschaal, stopwatch, plastic bak/emmer, meetlat, afstandhouder, watervaste viltstift, afdroogdoek
Mortelsamenstelling	Bakstenen, troffel, cement, kalk, metselzand, emmers en water.
Buigtrekproef	Bakstenen, troffel, cement, kalk, metselzand, emmers, water, waterpas, houten profiel(en), meetklokje en gewichten
Drukproef	Bakstenen, troffel, cement, kalk, metselzand, emmers, water, waterpas, houten profiel(en), plankjes/stalen platen en drukbank
Muur bouwen/beproeven	Bakstenen, troffel, cement, kalk, metselzand, emmers, water, waterpas, metseldraad, houten profielen, stalen I-profiel, plankjes, schoren, spijkers (duplexnagels), bodemplaat (underplayment), versnellingsmeter, databox en computer/laptop

Tabel 4 - Nodig materiaal

6 Conclusies

- **Interactive Physics**

Het programma Interactive Physics is gebleken een goed hulpmiddel te zijn bij het bepalen/voorspellen van het gedrag van constructies onder verschillende belastingen. Dit programma kan goed gebruikt worden voor de verschillende experimenten die uitgevoerd moeten worden voor het vak metselwerk.

- **Eigenschappen muur**

Van de verschillende eigenschappen van de muur, die zijn aangenomen bij de berekeningen/voorspellingen, is gebleken dat enkele ver afwijken van de waarden die voortgekomen zijn uit de verschillende experimenten.

De elasticiteitsmodulus voortgekomen uit de experimenten wijkt met een factor 500 af van de aangenomen waarde. Deze afwijking kan verschillende oorzaken hebben. Het proefstuk dat gebruikt is, is oorspronkelijk gebouwd voor het bepalen van de buigtreksterkte en is door de hele korte overspanning niet ideaal voor het bepalen van de E-modulus. Het nauwkeurig waarnemen van de zakking alvorens het proefstuk bezwijkt, is erg moeilijk. Voor het bepalen van de E-modulus is het daarom aangeraden de drukproef te gebruiken.

De stijfheid voortgekomen uit de experimenten wijkt met een factor 100 af van de aangenomen waarden. Deze afwijking kan veroorzaakt zijn door onder andere het feit dat de muur maar 2 weken de tijd heeft gehad om uit te harden. Verder is de stijfheid bij het 2^e experiment op de muur bepaald. De muur vertoonde toen al scheuren die veroorzaakt zijn bij het uitvoeren van het 1^e experiment wat kan hebben geleid tot lagere stijfheid. Er is bij de berekening ook uitgegaan van een volledige inklemming wat bij de muur niet het geval was en er is reeds gebleken dat de voor de E-modulus aangenomen waarde ver afwijkt van de uit de experimenten bepaalde waarde. Bij het berekenen van de stijfheid moet er met een andere (realistischere) waarde voor de stijfheid gewerkt worden en de uiteindelijke beproeving moet nauwkeuriger uitgevoerd worden. Dit kan bijvoorbeeld door de muur volledig te laten uitharden en in “originele” staat de beproeven.

De gemeten eigenfrequentie van de muur wijkt ook af van de voorspelde waarde. Doordat de stijfheid van de muur lager is dan verwacht, is het echter logisch dat de eigenfrequentie van de muur lager blijkt te zijn dan er voorspeld was.

Bijlage

1. Eigenschappen muur bepalen

Om voorspellingen te kunnen doen over de responsie van de muur ten opzichte van de verschillende belastingen moeten enkele eigenschappen van de muur bepaald worden. De massa (M), elasticiteitsmodulus (E), demping(ξ), stijfheid (k) en de eigenfrequentie (f_e) moeten bepaald worden.

Elasticiteitsmodulus

De E-modulus kan bepaald worden met de data verkregen uit de drukproef. Deze proef is echter (nog) niet uitgevoerd. Er wordt daarom een waarde aangenomen:

$$E = 10000 \text{ N} / \text{mm}^2$$

Massa

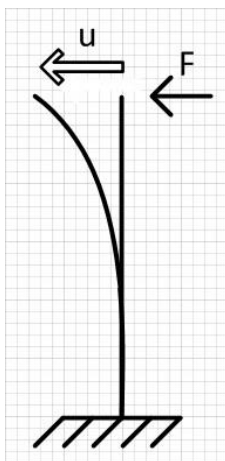
De massa van de muur kan alleen exact bepaald worden door deze op de weegschaal te zetten. Dit kost echter te veel tijd en moeite. Om toch een waarde te krijgen kan de massa van de muur benaderd worden met een berekening. Hierbij wordt er voor de dichtheid van metselwerk (bakstenen en voegen samen) een waarde van 2000 kg/m^3 aangenomen. In de berekening wordt er gewerkt met een meewerkende massa die wordt aangehouden op 0.5 keer de werkelijke massa. De massa van de muur kan dan berekend worden met:

$$M = 0.5 * l * b * h * \rho_{\text{metselwerk}}$$

$$M = (0.5 * 1 * 1.5 * 0.1) * 2000 = 150 \text{ kg}$$

Stijfheid

Voor het bepalen van de stijfheid wordt een vergeet-mij-nietje voor de uitwijking gebruikt. Deze uitwijking wordt veroorzaakt door een puntlast op het uiteinde van een ingeklemde uitkragende ligger (Figuur 26). Voor de lengte wordt er gerekend met een meewerkende lengte welke is aangehouden op 0.8 keer de normale lengte.



vergeet-mij-nietje:

$$u = \frac{F(0.8l)^3}{3EI}$$

$$F = ku \rightarrow k = \frac{F}{u}$$

$$k = \frac{3EI}{(0.8l)^3} = 7324.218 \text{ N} / \text{mm}$$

$$k = 7324218 \text{ N} / \text{m}$$

Figuur 26 - Uitkragende ligger

Eigenfrequentie

Voor het bepalen van de eigenfrequentie wordt eerst de eigenhoekfrequentie bepaald met de

formule: Eigenhoekfrequentie: $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{M}} = 220.971$

Vervolgens kan de eigenfrequentie berekend worden met de gevonden waarde voor de

eigenhoekfrequentie volgens: Eigenfrequentie: $f_e = \frac{1}{2\pi} \omega_0 = 35.19$

2. Schudtafel

Het bepalen van de bewegingsvergelijking voor de schudtafel en het verder oplossen van deze vergelijking worden uitgebreid toegelicht.

Bewegingsvergelijking

De schudtafel veroorzaakt een bepaalde belasting (excitatie). Deze belasting (U_0) wordt als een harmonische belasting beschouwd.

$$U_0 = \hat{u}_0 \cos(\omega t)$$

Voor het bepalen van de bewegingsvergelijking wordt gebruik gemaakt van:

$$\sum F_h = 0$$

Hieruit volgt:

$$M\ddot{u} = F_{veer}$$

$$F_{veer} = k(u_0 - u)$$

De bewegingsvergelijking luidt dan: $M\ddot{u} - k(u_0 - u) = 0$

In geval van eigenbeweging zonder damping geldt:

$$u_0 = 0$$

$$M\ddot{u} + ku = 0$$

Indien er wel een opgelegde beweging aanwezig is, maar er nog geen sprake is van damping geldt:

$$M\ddot{u} + ku = ku_0$$

Indien er wel met damping gerekend moet worden geldt voor de eigenbeweging:

$$M\ddot{u} + c\dot{u} + ku = 0$$

Voor de opgelegde beweging met damping geldt:

$$M\ddot{u} + c\dot{u} + ku = kU_0$$

$$M\ddot{u} + c\dot{u} + ku = k\hat{u}_0 \cos(\omega t)$$

Zoals eerder vermeld, neemt de eigenbeweging geleidelijk af totdat alleen de gedwongen beweging nog aanwezig is. Hierbij wordt er gesproken van de steady-state response. De steady-state response

wordt bepaald door de particuliere oplossing voor de bewegingsvergelijking te bepalen. Het bepalen van deze oplossing is in Maple gedaan volgens (Figuur 27):

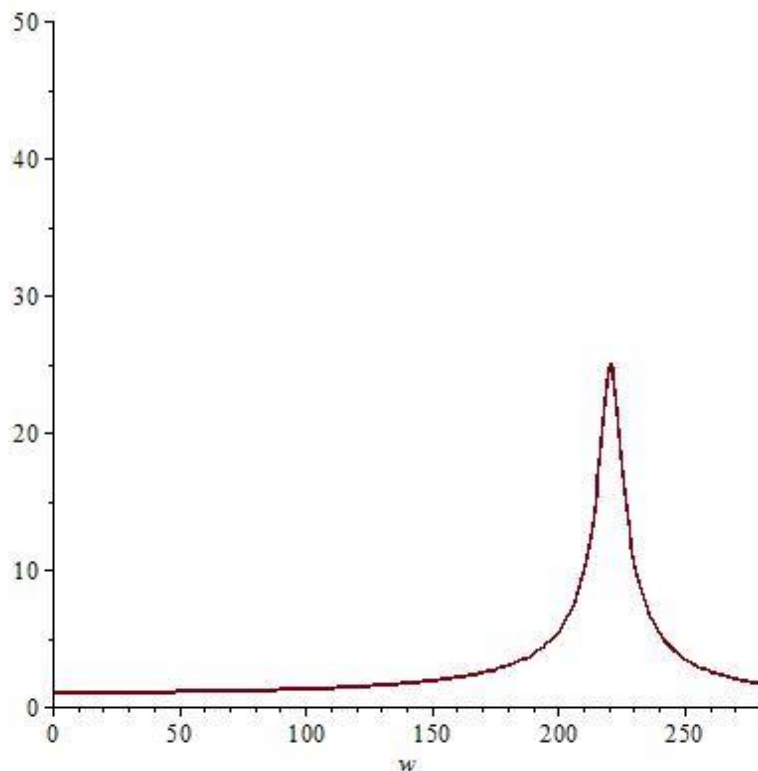
```

M·u'' + c·u' + k·u = k·U0
Up = Uc·cos(wt) + Us·sin(wt)
> solve({-M·Uc·w^2 + c·Us·w + k·Uc = k·U0, -M·Us·w^2 - c·Uc·w + k·Us = 0}, {Uc, Us});
      [Uc = - (Mw^2 - k) U0 k / (M^2 w^4 - 2 M k w^2 + c^2 w^2 + k^2), Us = U0 c k w / (M^2 w^4 - 2 M k w^2 + c^2 w^2 + k^2)]
> Uc := - (Mw^2 - k) U0 k / (M^2 w^4 - 2 M k w^2 + c^2 w^2 + k^2); Us := U0 c k w / (M^2 w^4 - 2 M k w^2 + c^2 w^2 + k^2);
> Ust := sqrt(Uc^2 + Us^2);
      Ust := sqrt( (Mw^2 - k)^2 U0^2 k^2 / (M^2 w^4 - 2 M k w^2 + c^2 w^2 + k^2)^2 + U0^2 c^2 k^2 w^2 / (M^2 w^4 - 2 M k w^2 + c^2 w^2 + k^2)^2 )
> simplify(Ust);
      sqrt( U0^2 k^2 / (M^2 w^4 - 2 M k w^2 + c^2 w^2 + k^2) )
> y( Usteady / U0 ) := k / sqrt(M^2 w^4 - 2 M k w^2 + c^2 w^2 + k^2);
> M := 150 : xi := 0.02 : c := xi · 2 · sqrt(k · M) : k := 7324218 :
> we := evalf(sqrt(k / M));
      we := 220.9708578
> plot( (abs( k / sqrt(M^2 w^4 - 2 M k w^2 + c^2 w^2 + k^2) ) ), w = 0 .. 280, 0 .. 50 );

```

Figuur 27 - Maple berekening Schudtafel

De responsie op de door de schudtafel veroorzaakte belasting die volgt uit deze berekening is (Figuur 28):



Figuur 28 - Responsie schudtafel

3. Shaker

Bewegingsvergelijking

De shaker veroorzaakt een bepaalde belasting (excitatie) op de muur. Deze excitatie wordt als een harmonische belasting beschouwd.

$$e = \hat{e}_0 \cos(\omega t)$$

Voor het bepalen van de bewegingsvergelijking wordt gebruik gemaakt van:

$$\sum F_h = 0$$

Hieruit volgt:

$$M\ddot{u} + M_{shaker}(\ddot{u} + \ddot{e}) + ku = 0$$
$$\ddot{e} = -\hat{e}_0 \omega^2 \cos(\omega t)$$

De bewegingsvergelijking luidt dan:

$$M\ddot{u} + M_{shaker}(\ddot{u} + \ddot{e}) + ku = 0$$

In geval van eigenbeweging zonder damping geldt:

$$\ddot{e} = 0$$
$$(M + M_{shaker})\ddot{u} + ku = 0$$

Indien er wel een opgelegde beweging aanwezig is maar er nog geen sprake is van damping geldt:

$$(M + M_{shaker})\ddot{u} + ku = -M_{shaker}\ddot{e}$$

Indien er wel met damping gerekend moet worden geldt voor de eigenbeweging:

$$(M + M_{shaker})\ddot{u} + c\dot{u} + ku = 0$$

Voor de opgelegde beweging met damping geldt:

$$(M + M_{shaker})\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -M_{shaker}\ddot{e}$$
$$(M + M_{shaker})\ddot{u} + c\dot{u} + ku = M_{shaker}\hat{e}_0 \omega^2 \cos(\omega t)$$

Voor deze vergelijking wordt de particuliere oplossing bepaald in Maple volgens (Figuur 29):

```


$$(M + M_{shaker}) \cdot u'' + c \cdot u' + k \cdot u = -M_{shaker} \cdot e'' \quad ; \quad (M_{shaker} = MI)$$


$$Up = Uc \cdot \cos(wt) + Us \cdot \sin(wt)$$

> solve({ -(M + MI) · Uc · w² + c · Us · w + k · Uc = (MI · e0 · w²), -(M + MI) · Us · w² - c · Uc · w + k · Us = 0 }, { Uc, Us });

$$\left\{ Uc = -\frac{(Mw^2 + MIw^2 - k) MI e0 w^2}{M^2 w^4 + 2 MMI w^4 + MI^2 w^4 - 2 Mkw^2 - 2 MIkw^2 + c^2 w^2 + k^2}, Us = \frac{MI c e0 w^3}{M^2 w^4 + 2 MMI w^4 + MI^2 w^4 - 2 Mkw^2 - 2 MIkw^2 + c^2 w^2 + k^2} \right\}$$

> Uc := -\frac{(Mw^2 + MIw^2 - k) MI e0 w^2}{M^2 w^4 + 2 MMI w^4 + MI^2 w^4 - 2 Mkw^2 - 2 MIkw^2 + c^2 w^2 + k^2} : Us := \frac{MI c e0 w^3}{M^2 w^4 + 2 MMI w^4 + MI^2 w^4 - 2 Mkw^2 - 2 MIkw^2 + c^2 w^2 + k^2} :
> Ust := sqrt(Uc^2 + Us^2);

$$Ust := \sqrt{\frac{(Mw^2 + MIw^2 - k)^2 MI^2 e0^2 w^4}{(M^2 w^4 + 2 MMI w^4 + MI^2 w^4 - 2 Mkw^2 - 2 MIkw^2 + c^2 w^2 + k^2)^2} + \frac{MI^2 c^2 e0^2 w^6}{(M^2 w^4 + 2 MMI w^4 + MI^2 w^4 - 2 Mkw^2 - 2 MIkw^2 + c^2 w^2 + k^2)^2}}$$

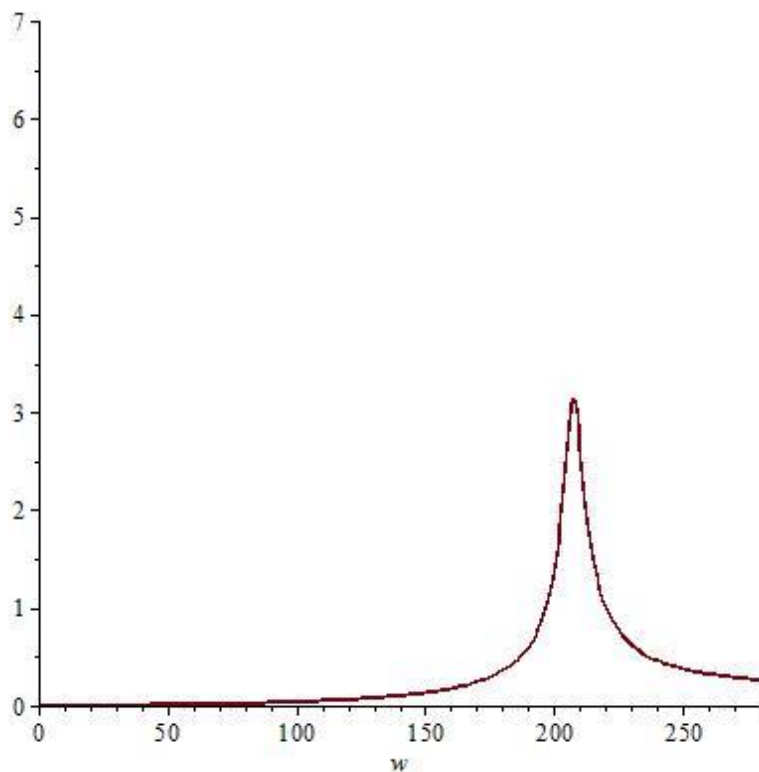
> simplify(Ust);

$$\sqrt{\frac{MI^2 e0^2 w^4}{M^2 w^4 + 2 MMI w^4 + MI^2 w^4 - 2 Mkw^2 - 2 MIkw^2 + c^2 w^2 + k^2}}$$

> y(\frac{Usteady}{e0}) := \frac{sqrt(MI^2 w^4)}{sqrt(M^2 w^4 + 2 MMI w^4 + MI^2 w^4 - 2 Mkw^2 - 2 MIkw^2 + c^2 w^2 + k^2)} :
> M := 150 : MI := 20 : xi := 0.02 : c := xi · sqrt(k · M) : k := 7324218 :
> plot\left(\left(\frac{\sqrt{MI^2 w^4}}{\sqrt{M^2 w^4 + 2 MMI w^4 + MI^2 w^4 - 2 Mkw^2 - 2 MIkw^2 + c^2 w^2 + k^2}}\right), w = 0 .. 280, 0 .. 7\right) :
```

Figuur 29 - Maple berekening Shaker

De responsie op de door de schudtafel veroorzaakte belasting die volgt uit deze berekening is (Figuur 30):

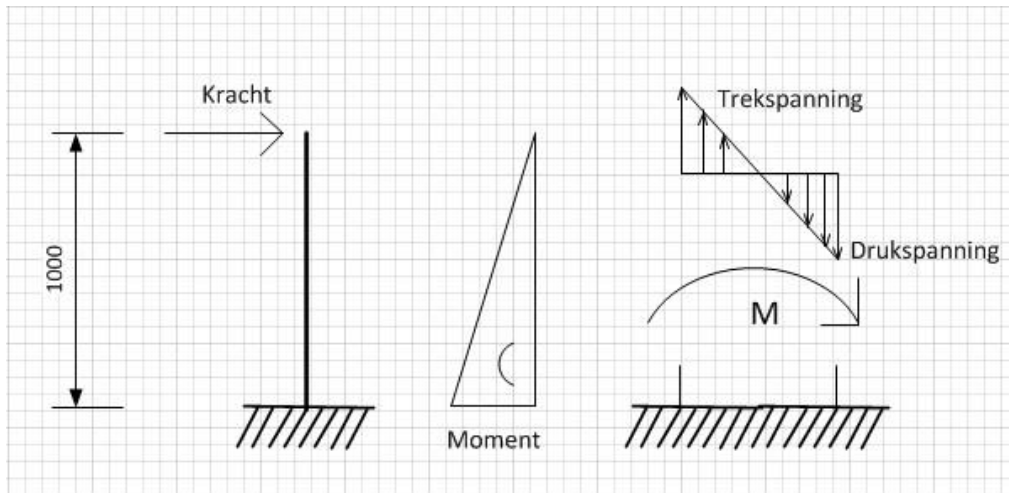


Figuur 30 - Responsie Shaker

Maximale kracht en uitwijking

De maximaal toelaatbare horizontale belasting die de shaker veroorzaakt op de muur moet bepaald worden. Deze belasting kan bepaald worden door gebruik te maken van de maximaal opneembare trekspanning van het metselwerk. De maximale trekspanning in het metselwerk treedt op, op de plek waar het moment maximaal is. Het moment is maximaal bij de inklemming (onderaan de muur). Om

dit moment te bepalen wordt het metselwerk geschematiseerd als een ingeklemde ligger zoals aangegeven in Figuur 31. Indien deze maximale trekspanning overschreden wordt, zullen er scheuren ontstaan in het metselwerk.



Figuur 31 - Maximaal moment t.g.v. puntlast

Het maximale moment kan bepaald worden met:

$$M = F * L$$

De maximale trekspanning die door het metselwerk kan worden opgenomen wordt aangehouden op:

$$\sigma_{\max} = 3N / mm^2$$

Voor het bepalen van de spanningen in het metselwerk ten gevolge van het optredende moment kan gebruik worden gemaakt van:

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{Fl}{\frac{1}{6}bh^2} = \frac{F * 1000}{\frac{1}{6} * 1500 * 100^2} = 4 * 10^{-4} * F$$

Deze spanning moet kleiner of gelijk zijn aan de aangenomen maximale trekspanning die het metselwerk kan opnemen.

$$\sigma_{\max} = 3N / mm^2 = 4 * 10^{-4} * F_{\max}$$

De maximale waarde voor de belasting kan vervolgens bepaald worden m.b.v.:

$$F_{\max} = 7500N = 7.5kN$$

Indien deze belasting optreedt zal er een bepaalde uitwijking veroorzaakt worden. Deze uitwijking kan met een vergeet-mij-nietje bepaald worden.

$$u = \frac{Fl^3}{3EI}$$

Voor het uitrekenen van deze uitwijking zijn verder nog de elasticiteitsmodulus (E) en het traagheidsmoment (I) nodig.

$$E = 10000 \text{ N} / \text{mm}^2$$

$$I = \frac{1}{12}bh^3 = 125 * 10^6$$

Voor de maximaal toelaatbare uitwijking waarbij er niet geen scheuren ontstaan in het metselwerk geldt:

$$u = \frac{Fl^3}{3EI} = 2 \text{ mm}$$

4. Buigtreksterkte metselwerk

Voor het bepalen van de buigtreksterkte van metselwerk is een proefstuk van 4 bakstenen met een overspanning van 0.2346m op buiging beproefd. Het proefstuk is zodanig geplaatst dat het vlak evenwijdig aan de lintvoegen als bezwijkvlak geldt. Voor het bepalen van de buigtreksterkte geldt:

$$f_m = \frac{M_{\max} z}{I_{zz}}$$

Het maximale optredende moment ligt in het midden van het proefstuk. Dit moment wordt veroorzaakt door zowel de geplaatste gewichten als het eigen gewicht van het proefstuk. Het proefstuk is bezweken bij een maximaal gewicht van 7 kg. Het eigen gewicht is bepaald door het proefstuk te wegen. Dit eigen gewicht wordt als q-last beschouwd in de verdere berekening. Voor de belastingen geldt:

$$\text{Gewogen} \rightarrow 8.5664 \text{ kg} = 8.5664 * 9.81 = 84.0364 \text{ N} = 0.084 \text{ kN}$$

$$q_{e.g.} = \frac{0.084}{0.2346} = 0.358 \text{ kN} / \text{m}$$

$$F = 7 * 9.81 = 68.67 \text{ N} = 0.06867 \text{ kN}$$

Voor het moment geldt:

$$M_{gew} = \frac{1}{4}Fl = \frac{1}{4} * 0.0687 * 0.2346 = 4.027 * 10^{-3} \text{ kNm}$$

$$M_q = \frac{1}{8}ql^2 = \frac{1}{8} * 0.358 * 0.2346^2 = 2.4633 * 10^{-3} \text{ kNm}$$

$$M_{\max} = M_{e.g.} + M_q = 4.027 * 10^{-3} + 2.4633 * 10^{-3} = 6.4903 * 10^{-3} \text{ kNm}$$

Voor de maximale afstand van het normaalkrachten centrum tot de uiterste vezel (z) en het traagheidsmoment (I_{zz}) geldt:

$$z = \frac{1}{2}h = \frac{1}{2} * 0.101 = 0.0505m$$

$$I_{zz} = \frac{1}{12}bh^3 = \frac{1}{12} 0.210 * 0.101^3 = 18.0303 * 10^{-6} m^4$$

$$f_m = \frac{M_{\max} z}{I_{zz}} = \frac{6.4903 * 10^{-3} * 0.0505}{18.0303 * 10^{-6}} = 18.178 kN / m^2$$

$$f_m = 18.178 kN / m^2 = 0.0182 N / mm^2$$

Voor het bepalen van de E-modulus is gebruik gemaakt van de vergeet-mij-nietjes voor de zakking in het midden van een ligger op twee steunpunten (Figuur 32).



Figuur 32 - vergeet-mij-nietjes

De totale zakking wordt veroorzaakt door het eigengewicht, welke als q-last wordt beschouwd en de extra geplaatste gewichten, welke als puntlast worden beschouwd. Voor de vergeet-mij-nietjes geldt:

$$w_q = \frac{5}{384} \frac{ql^4}{EI}; w_F = \frac{1}{48} \frac{Fl^3}{EI}$$

Voor de totale zakking geldt:

$$w = w_q + w_F = 0.15mm$$

Na de vergeet-mij-nietjes te hebben gesubstitueerd in de vergelijking voor de totale zakking volgt:

$$\frac{5}{384} \frac{ql^4}{EI} + \frac{1}{48} \frac{Fl^3}{EI} = 0.15mm$$

Hieruit kan de E-modulus bepaald worden.

$$E = 18.08 N / mm^2$$

5. Versnelling

De versnelling van de muur moet berekend worden zodat er bepaald kan worden met welke versnellingsmeter gewerkt moet worden. De muur zal harmonisch trillen en dus kan er een plaatsfunctie worden aangenomen:

$$u(t) = A \cos(\omega t)$$

De versnelling van de muur kan bepaald worden door de tweede afgeleide van de plaatsfunctie te bepalen.

$$a(t) = -\omega^2 A \cos(\omega t)$$

Voor de eigenfrequentie en de amplitude gelden:

$$\omega = 220.971$$

$$A = 1 \text{ mm}$$

Na deze waarden te substitueren in de vergelijking voor de versnelling, kan de maximale versnelling van de muur bepaald worden.

$$a(t) = -220.971^2 A \cos(220.971t)$$

Deze vergelijking is maximaal indien:

$$\cos(220.971t) = 1$$

De maximale waarde voor de versnelling is:

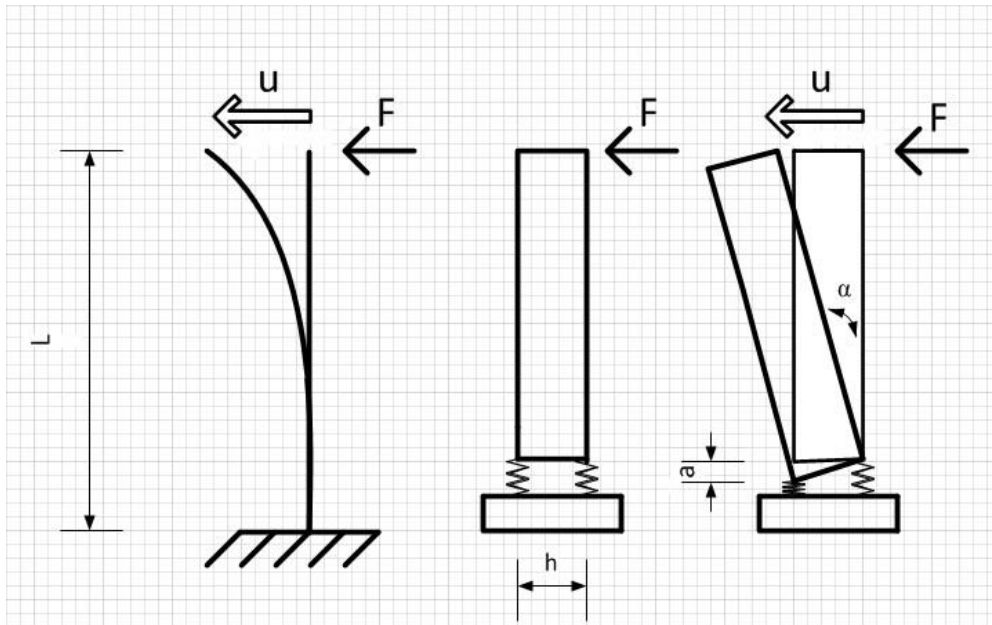
$$a_{\max} = -220.971^2 A = -48.828 \text{ m/s}^2$$

Uitgedrukt in gravitatie ($1g = 9.82 \text{ m/s}^2$) geldt voor de maximale versnelling:

$$a_{\max} = \frac{-48.828}{9.81} = 4.977 \text{ g}$$

6. Interactive Physics

Om het bezwijken van de muur te simuleren in IP, worden twee veren onderaan de muur aangenomen zoals aangegeven in Figuur 33.



Figuur 33 - Muur gemodelleerd op 2 veren

De uitwijking (u) ten gevolge van een kracht (F) op de muur kan bepaald worden met een vergeet-mij-nietje. Voor de uitwijking geldt verder:

$$u = L\alpha$$

$$\alpha = \frac{u}{L}$$

$$u = \frac{Fl^3}{3EI} \text{ (vergeet-mij-nietje)}$$

De totale indrukking of uitrekking van de veren wordt aangegeven met " a " en de kracht in de veren wordt aangegeven met " v ". Verder wordt de hoek aangegeven met " α " en de dikte van de muur aangegeven met " h ". Voor de uitrekking/indrukking van de veren geldt:

$$a = \alpha \frac{h}{2}$$

De kracht " v " in de veren kan bepaald worden door te kijken naar het evenwicht van de muur. Het koppel veroorzaakt door de horizontale kracht " F " en het koppel veroorzaakt door de krachten in de veren moeten gelijk zijn aan elkaar.

$$FL = vh$$

$$v = \frac{FL}{h}$$

Voor de stijfheid van de veren geldt vervolgens:

$$k = \frac{v}{a} = \frac{\frac{FL}{h}}{\alpha \frac{h}{2}}$$

$$k = \frac{2FL}{\alpha h^2} = \frac{2FL^2}{uh^2}$$

Substitueren van het vergeet-mij-nietje voor “u” geeft:

$$k = \frac{3EI}{Lh^2}$$

Om de vergelijking voor “k” verder te versimpelen kan de vergelijking voor het traagheidsmoment hierin gesubstitueerd worden.

$$k = \frac{3E \frac{1}{12} bh^3}{Lh^2}$$

$$k = \frac{Ebh}{4L}$$

Substitueren van de eigenschappen van de muur geeft als stijfheid voor de veren:

$$k = 1500000N / mm$$

Bronnen

- [1] M. v. Hunen, historisch Metselwerk, Zwolle: WBOOKS, 2012.
- [2] „Richtlijnen van dhr. Pasterkamp uit Verslagen Bend and Break Metselwerk 2013,” 2013.
- [3] „DIRIX elsloo,” DIRIX elsloo BV, [Online]. Available: <http://www.dirix.nl/diensten/tuin-amp-bouw/bouwstoffenkalk>. [Geopend oktober 2014].
- [4] K. V. Balen en D. V. Gemert, „De verwerkbaarheid van metselmortel,” *Cement 1*, 2010.
- [5] P. d. i. J. Blaauwendraad, *Dynamica van Systemen*, Delft: Technische Universiteit Delft , 2010.
- [6] N. Normalisatie-instituut, „NEN 6702:2001 Technische grondslagen voor bouwconstructies,” 01 12 2001.
- [7] G. Cocquyt, „Ontwerp van een niet-lineair trillingsabsorptie element,” 2010.
- [8] metselen.net, „metselen.net,” [Online]. Available: <http://www.metselen.net/voorbereiding%20voegen.html>. [Geopend 28 10 2014].
- [9] J. Rasenberg, „Interactive Physics,” Design Simulation Technologies (DST), [Online]. Available: <http://www.interactivephysics.nl/>. [Geopend 31 10 2014].