SCHUILPLAATS ONDER HET STEVIN II LAB

Een onderzoek naar de weerstand van de vloer van het Stevin II laboratorium tegen explosieven



Door Jelke Janssen

Onder begeleiding van dr. ir. P. C. J. Hoogenboom en prof. dr. H. M. Jonkers

TU Delft

23 juni 2025

Voorwoord

Dit verslag is geschreven als bachelor-eindproject voor de studie Civiele Techniek aan de Technische Universiteit Delft. In dit verslag is onderzocht wat de effecten zijn van een explosief op een laboratoriumvloer. Lezers die geïnteresseerd zijn in de dynamica van een vloer door een explosiekracht kunnen in dit verslag nuttige informatie vinden over de berekeningen en resultaten.

Graag wil ik mijn twee begeleiders, dr. ir. P.C.J. Hoogenboom en prof. dr. H.M. Jonkers, bedanken voor het meehelpen aan dit verslag. Hun feedback is erg waardevol geweest tijdens het werken aan dit verslag.

Jelke Janssen

Delft, juni 2025

Samenvatting

In dit verslag is onderzocht welke explosieven de vloer van het Stevin II laboratorium op de campus van de TU Delft aan zou kunnen. Er is een deel van deze vloer waar staal- en betonproeven op worden gedaan, waardoor deze vloer erg dik is. In het geval van een derde wereldoorlog is het geen gek idee om te kijken welke plekken kunnen worden gebruikt als schuilkelder, dus wordt gekeken of de ruimte onder deze vloer geschikt zou zijn door te kijken naar bij welke explosieven de vloer zou bezwijken.

Er is gekeken naar de inslag van zes verschillende explosieven: de artilleriegranaat, de Shahed-drone, de zweefbom, de kruisraket, de ballistische raket en de grote zweefbom. Deze explosieven zijn gekozen omdat ze verschillende eigenschappen hebben, zoals een verschil in snelheid en hoeveelheid TNT.

Om te bepalen welke explosieven de vloer zouden doen bezwijken en welke niet, is de vloer gemodelleerd als een massa-veersysteem. Hiervoor is gekeken wat de massa van de vloer is en is de veerstijfheid van de vloer bepaald door de momentcapaciteit om te zetten in een veerconstante. Ook is er rekening gehouden met demping. Voor de maximale doorbuiging is er gekeken naar wanneer het wapeningsstaal zou bezwijken. Daarnaast is ook de plastische vervorming meegenomen in de analyse; er is berekend wanneer de vloer een als een mechanisme zou gaan bewegen en dus de veerstijfheid zou verdwijnen.

De vloer is opgedeeld in twee stukken: een stuk in het midden, ondersteund door vier kolommen, en een stuk aan de zijkant, ondersteund door twee kolommen en een muur. Deze stukken vloer zijn vervolgens weer opgedeeld in kolom- en veldstroken, aangezien de wapening op deze stukken verschillend bleek te zijn. Voor de zijkant geldt dat deze als een mechanisme zal bewegen bij een doorbuiging van 77.1 mm en voor het middenstuk bij een doorbuiging van 110.6 mm. De maximale doorbuiging voor beide stukken is respectievelijk 254 mm en 320 mm.

Uiteindelijk bleek dat de vloer sterk genoeg was om de artilleriegranaat, de Shahed-drone en de zweefbom te weerstaan. De kruisraket, de ballistische raket en de grote zweefbom zorgen ervoor dat de vloer wel bezwijkt. Aan de hand van het model is er gekeken welke eigenschappen maatgevend waren voor het bezwijken aan de hand van het model. Zo bleek dat de snelheid waarmee het explosief inslaat een erg belangrijke factor is in het bezwijken. De hoeveelheid TNT was minder maatgevend, maar zou in grote mate nog steeds ervoor kunnen zorgen dat de vloer bezwijkt. De dempingsratio bleek niet maatgevend voor het wel of niet bezwijken.

Er is ook onderzocht of de vloer zou bezwijken op pons. Dit bleek alleen bij de kruisraket en de ballistische raket zo te zijn. Het bezwijken op doorbuiging bleek dus maatgevend te zijn voor deze vloer.

Inhoudsopgave

Voorwoord .....
Samenvatting ii
1. Inleiding 1
1.1 Introductie 1
1.2 Onderzoeksvraag 1
1.3 Structuur 1
2. Methode 2
3. Explosieven 4
3.1 Eigenschappen verschillende explosieven 4
3.2 Berekening van explosiekrachten 5
3.3 Berekening van impuls door inslag 7
4. Buiging 8
4.1 Eigenschappen vloer 8
4.2 Berekening momentcapaciteit 10
4.3 Berekening doorbuiging bij plastische scharnieren 11
4.4 Berekening maximale doorbuiging 13
5. Massa-veersysteem 16
5.1 Stijfheid 16
5.2 Massa 18
5.3 Demping 19
5.4 Oplossen van systeem 20
5.5 Resultaten 21
5.6 Controleren van het model 24
6. Pons 25
6.1 Pons bij kolom 27
6.2 Pons bij explosieven 27
6.3 Bezwijken door pons 28
7. Discussie 29
8. Conclusie 31
Referentielijst 32
Bijlage 1: Bouwtekeningen 34

Bijlage 2: Uitwerkingen 37
Bijlage 3: Python-model 40
Bijlage 4: Grafieken van doorbuigingen door alle explosieven. 45
Bijlage 5: Dynamisch model voor bepalen bezwijken op pons 47

1. Inleiding

1.1 Introductie

Het is sinds de Tweede Wereldoorlog lang rustig geweest in West-Europa als het ging om oorlogen, maar sinds een paar jaar zijn er steeds meer dreigingen die zijn komen opspelen. Zo is de oorlog in Oekraïne al een paar jaar bezig, zijn Israël en Palestina flink aan het vechten, en is er sinds kort zelfs een dreiging vanuit de Verenigde Staten van Trump. Het is dus helemaal geen gek idee om te kijken naar de faciliteiten die er zijn in het geval dat er een bom deze kant op zou worden gestuurd.

Een van de plekken op de campus van TU Delft die eventueel zou kunnen worden gebruikt als schuilkelder in zo'n extreem geval is de kelder in het Stevin II laboratorium. Een deel van het laboratorium wordt namelijk gebruikt voor beton- en staalproeven, die zorgen voor een erg hoge belasting op de vloer eronder. Dit is dan ook de reden dat bij een klein deel van het lab de vloer 1.2 meter dikte is aangelegd. Hieronder is een gesloten ruimte waar je makkelijk via een trap kan komen. Deze ruimte onder de vloer zou dus eventueel kunnen dienen als schuilkelder in het geval dat ineens nodig blijkt te zijn.

Het feit dat de vloer zo dik is, betekent echter niet dat deze ook perfect geschikt is om te gebruiken als schuilkelder. In dit rapport wordt daarom onderzocht welke explosieven deze vloer aan zou kunnen en vanaf welke kracht hij zal bezwijken.

1.2 Onderzoeksvraag

Welke explosieven kan de Stevin II vloer weerstaan?

Bij het beantwoorden van deze vraag worden er verschillende tussenvragen gebruikt:

1. Welke explosieven moeten worden meegenomen in het onderzoek?
2. Wat is de statische en dynamische belasting op de vloer?
3. Wat is de momentcapaciteit van de vloer?
4. Wat is de ponscapaciteit van de vloer?
5. Bij welke explosieven zal de vloer bezwijken?

1.3 Structuur

Het verslag heeft de volgende opbouw: Hoofdstuk 2 bevat de methode en beschrijft hoe de onderzoeksvraag is beantwoord. Hoofdstuk 3 beschrijft de eigenschappen van verschillende explosieven en laat zien hoe de dynamische kracht van de explosieven wordt berekend. In hoofdstuk 4 wordt de momentcapaciteit van de vloer en de maximale doorbuiging berekend. In hoofdstuk 5 wordt het model beschreven en worden resultaten gegeven aan de hand van het model. In hoofdstuk 6 wordt er gekeken naar het bezwijken van de vloer op pons. In hoofdstuk 7 wordt in de discussie antwoord gegeven op de onderzoeksvraag en worden de resultaten geïnterpreteerd en in hoofdstuk 8 worden de belangrijkste bevindingen op een rij gezet en worden er aanbevelingen gedaan voor een eventueel vervolgonderzoek

2. Methode

In dit rapport is onderzocht welke explosieven de vloer van het Stevin II laboratorium kan weerstaan. Hiervoor zijn verschillende berekeningen en aannames gedaan om tot een conclusie te kunnen komen.

Allereerst is er gekeken welke explosieven moesten worden meegenomen in het onderzoek. Er zijn verschillende explosieven opgeschreven die diverse eigenschappen hebben om een zo ruim mogelijk beeld te kunnen geven van welke explosieven de vloer aan zou kunnen. Vervolgens is met behulp van Bakers vergelijking bepaald wat de kracht van de positieve drukgolf is die door de explosieven zou ontstaan op de vloer. Ook is er met behulp van het principe van behoud van impuls bepaald wat de impulskracht zou zijn die door de explosieven op de vloer zou worden uitgeoefend.

Vervolgens is er gekeken naar de eigenschappen van de vloer zelf. Hier is gebruikgemaakt van de bouwtekeningen van de vloer die zijn gevonden bij de Campus Real Estate & Facility Management. Uit deze bouwtekeningen zijn de afmetingen en materialen van de vloer en de wapeningseigenschappen gehaald. Vervolgens is met deze gegevens de momentcapaciteit en de stijfheid van de vloer berekend. Voor deze berekeningen is er gekeken naar twee delen van de vloer: eentje in het midden, ondersteund door vier kolommen, en eentje aan de zijkant, ondersteund door twee kolommen en een muur. Deze stukken vloer zijn vervolgens weer opgedeeld in kolom- en veldstroken, aangezien de wapening op deze stukken verschillend bleek te zijn.

Met behulp van deze gegevens is vervolgens de doorbuiging berekend waarbij de vloer plastisch begint te vervormen en een mechanisme is geworden. Ook is er gekeken wat de maximale doorbuiging is van de vloer. Dit werd gedaan door te kijken naar de maximale rek van het wapeningsstaal en op basis daarvan te berekenen hoever de vloer kan doorzakken. Hierbij is aangenomen dat er maar een enkele scheur zou ontstaan bij het bezwijken van de vloer. Er is bij het maken van deze berekening geen rekening gehouden met het gedrag van de gehele vloer, maar enkel van het stuk vloer waarnaar werd gekeken.

Om te kunnen berekenen wat de doorzakking van de vloer zou zijn als een explosief erop zou neerkomen, is de vloer gemodelleerd als een massa-veersysteem met een enkele vrijheidsgraad. Hierbij is gekeken wat de massa van de vloer was die meebeweegt, en wat de demping van de vloer is. Er is hierbij aangenomen dat de opgedeelde stukken vloer als een grote massa mee zou gaan bewegen in het geval van een inslag. Vervolgens is het model met een numerieke methode, namelijk de voorwaartse Euler-methode, opgelost en in Python gemodelleerd. Er zijn grafieken geplot voor twee verschillende delen van de vloer, en voor elk explosief apart. Vervolgens is er gekeken naar welke explosieven wel en niet de vloer zouden doen bezwijken.

Ook is er gekeken naar welke eigenschappen van een explosief maatgevend zijn voor het wel of niet bezwijken van een vloer. Dit is gedaan door de eigenschappen in het model aan te passen en te kijken wat dat zou betekenen voor de doorbuiging van de vloer. Er is gekeken naar de

hoeveelheid TNT in een explosief, de snelheid waarmee het explosief inslaat en de dempingsratio van de vloer.

Als laatst is het model gecontroleerd door te kijken of de periode van de modellen overeen kwam met de periode die de beweging theoretisch zou moeten hebben.

Niet alleen is er gekeken naar bezwijken op doorbuiging, ook is er gekeken naar het faalmechanisme pons. De dwarskracht is berekend zowel boven de kolommen als rondom het explosief bij de plek van inslag. Op deze beide plekken zou pons kunnen ontstaan. Met behulp van berekeningen is bepaald welke explosieven de vloer zouden laten bezwijken en of dit faalmechanisme maatgevend is.

3. Explosieven

Om te kunnen bepalen welke explosieven de vloer van het Stevin II lab kan weerstaan moeten verschillende soorten explosieven worden bekeken met verschillende eigenschappen. In dit hoofdstuk zijn verschillende explosieven met hun belangrijkste eigenschappen te vinden en is de berekening van de kracht van het explosief op de vloer gedaan.

3.1 Eigenschappen verschillende explosieven

Van zes soorten explosieven zijn de benodigde waardes weergegeven. Er is gekozen voor explosieven die zo veel mogelijk verschillen in ordegrootte van gewicht en snelheid, zodat er een zo ruim mogelijk beeld kan worden gegeven van wat voor schade een explosief zou kunnen geven aan de vloer van het Stevin II lab.

Tabel 1: Eigenschappen van verschillende bommen en explosieven die worden gebruikt in een oorlog[1].

	Massa (kg)	W_{TNT} (kg)	Diameter (m)	Snelheid (km/u)
Artilleriegranaat	20	10	0.15	12.6
Shahed-drone	200	50	0.6	185
Zweefbom	500	200	0.4	370
Kruisraket	1200	100	0.5	3060
Ballistische raket	2500	400	0.5	3672
Grote zweefbom	3000	2200	0.9	400

Zoals te zien is in tabel 1, is het gewicht van de explosieve stof in hoeveelheid TNT uitgedrukt. Om modellen van explosies te versimpelen wordt er namelijk een TNT-equivalent toegeschreven aan explosieven. Deze equivalent hangt af van de maximale druk, de maximale positieve impuls of de ontploffingshitte. Deze worden vergeleken met die van TNT onder vergelijkbare omstandigheden, waarna de equivalent wordt bepaald.

De formule die wordt gebruikt om het gewicht in TNT-equivalent te bepalen op basis van impuls is de volgende (Uddin, 2010):

$$W_{i_{TNT}} = \left(\frac{i}{i_{TNT}}\right) W$$

In tabel 2 staan TNT-equivalenten van veelvoorkomende explosieve stoffen. Deze zijn gebruikt om het TNT-equivalente gewicht te bepalen van de bovengenoemde projectielen.

[1] Deze waardes zijn in mondeling overleg besproken met de begeleider. Het zijn geen exacte waardes, maar ze zitten wel in de juiste ordegrootte, zodat ze bruikbaar zijn voor dit onderzoek.

Tabel 2: "Representative densities, heats of detonation, and TNT-equivalencies for common explosives" (Uddin, 2010).

Explosive	ρ_0[1](g/cc)	ΔH_d (MJ/kg)	TNT-equivalent weight based on			
			P	i	Pressure range (MPa) for *P*, *i*	ΔH_d
Ammonia dynamite[4]	1.30	NA[2]	0.70	0.70[3]	NA[2]	–
ANFO[5]	NA[2]	NA[2]	0.87	0.87[3]	0.03–6.90	–
HMX	1.80–**1.90**	6.78	1.25	1.25[3]	NA[2]	1.15
NG dynamite[6]	NA[2]	NA[2]	0.90	0.90[3]	NA[2]	–
PETN	1.67–**1.78**	6.90	1.27	1.27[3]	0.03–0.69	1.17
RDX	1.63–**1.81**	6.78	1.10	1.10[3]	NA[2]	1.15
TNT	1.53–**1.65**	5.90	1.00	1.00	Standard	1.00
Tetryl	1.50–1.73	6.32	1.07	1.07[3]	0.02–0.14	1.07
Tritonal	1.72	NA[2]	1.07	0.96	0.03–0.69	–

Deze equivalent is al meegenomen in tabel 1, waardoor de waardes W_{TNT} die er in de tabel staan gelijk zijn aan het gewicht van de explosieven uitgedrukt in de hoeveelheid TNT.

3.2 Berekening van explosiekrachten

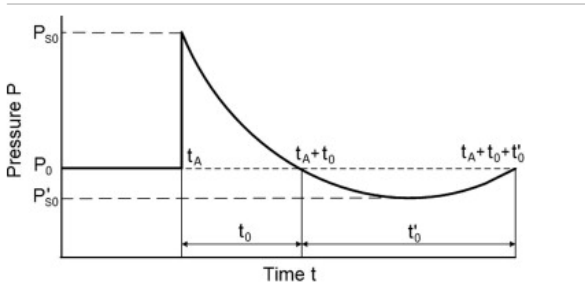
Om te kunnen berekenen bij welke explosieven de vloer zal bezwijken zal er eerst gekeken moeten worden naar hoe de kracht van de explosie wordt overgebracht naar de vloer.

Een manier om dit te doen is om de druk die vrijkomt bij een explosie om te zetten in een impuls. Dit kan door de druk te integreren over de tijd. Voor de berekening van de druk wordt de vergelijking van Baker gebruikt. Deze maakt gebruik van de geschaalde afstand Z, die wordt berekend aan de hand van de afstand van de explosie tot de vloer, R, en het gewicht van de explosie (Tai et al., 2011).

$$P_{s0} = 20.06Z^{-1} + 1.94Z^{-2} - 0.04Z^{-3} \cdot 10^5\ [Pa](0.05 \leq Z \leq 0.5)$$

$$\text{met } Z = R/W^{\frac{1}{3}}\ [m/kg^{1/3}]$$

De druk die vrijkomt tijdens een explosie is niet constant, maar zal eerst een positieve drukgolf veroorzaken, om vervolgens te veranderen in een negatieve drukgolf, zie figuur 1.



Figuur 1: Grafiek van drukverdeling explosie over tijd (Tai et al., 2011). Een positieve drukgolf is te zien daar waar P > P0 en een negatieve drukgolf is te zien daar waar P < P0.

Voor dit onderzoek is alleen de positieve drukgolf van belang, aangezien deze significanter is dan de negatieve drukgolf als het gaat om het bezwijken van een constructie (Vasileios & George, 2013). Om het probleem iets te versimpelen wordt er een lineair verband aangenomen voor het verloop van de positieve drukgolf.

Om de druk om te zetten in een kracht wordt de druk vermenigvuldigd met het oppervlakte van de inslag. Er is in dit geval uitgegaan van het feit dat alle explosieven perfecte cirkels hebben als oppervlak. Omdat de druk lineair wordt aangenomen over de tijd is ook de kracht lineair te verdelen over de tijd. De formule die uiteindelijk is gebruikt om per explosief de kracht mee te berekenen is de volgende:

$$F = P \cdot A$$

$$F(t) = P_{s0} \cdot \left(1 - \frac{t}{t_0}\right) \cdot \frac{1}{4}\pi \cdot d^2$$

In deze formule is A het oppervlakte van inslag, P_{s0} de maximale druk van de positieve drukgolf, t_0 de duur van de positieve drukgolf en d de diameter van het explosief.

Voor R wordt een waarde van 1 m aangenomen voor elk explosief. Dit wordt gedaan zodat de ontploffing zo dicht mogelijk bij de grond kan plaatsvinden, terwijl er nog wel gebruikgemaakt kan worden van de vergelijking van Baker (Z ligt hierdoor tussen de 0.05 en 0.5 bij elk explosief).

Volgens de Hopkinson-Cranz-wet is de tijd t_0 van een explosie evenredig te schalen voor elk explosief. De schaalfactor is hier $W^{1/3}$ (Lutzenberger, 2000). Voor een explosief met een TNT-gewicht van 1 kg op een afstand van 1 meter bleek t_0 gelijk aan 0.001 seconde (Angelides et al., 2023). Op basis hiervan is dus met de schaalfactor de tijdsduur van de positieve drukgolf van de explosieven bepaald.

Bijvoorbeeld voor de artilleriegranaat:

$$t_0 = 0.001 \cdot 10^{\frac{1}{3}} = 0.00215\ s$$

In tabel 3 zijn de berekende waardes voor de druk en de tijdsduur weergegeven. De kracht is een functie van de tijd en zal worden berekend met behulp van een python-model.

Tabel 3: waardes voor druk en impuls van verschillende explosieven.

	W_{TNT} (kg)	Z (m / $kg^{1/3}$)	P_{s0} (kPa)	t_0 (s)
Artilleriegranaat	10	0.464	5182.3	0.00215
Shahed-drone	50	0.271	9823.2	0.00368
Zweefbom	200	0.171	17566.9	0.00585
Kruisraket	100	0.215	13090.6	0.00464
Ballistische raket	400	0.138	23712.3	0.00737
Grote zweefbom	2200	0.077	50105.7	0.01301

3.3 Berekening van impuls door inslag

Een explosie heeft niet alleen een drukgolf bij het ontploffen; ook hebben de bommen een impuls die ze overdragen bij inslag. Deze impulsoverdracht is te berekenen met de wet van behoud van impuls. Er wordt hierbij vanuit gegaan dat na impact het explosief en de vloer samen verdergaan als een grote massa.

De wet van behoud van impuls ziet er als volgt uit:

$$m_{expl} \cdot v_{expl,voor} + m_{vloer} \cdot v_{vloer,voor} = (m_{expl} + m_{vloer}) \cdot v_{na}$$

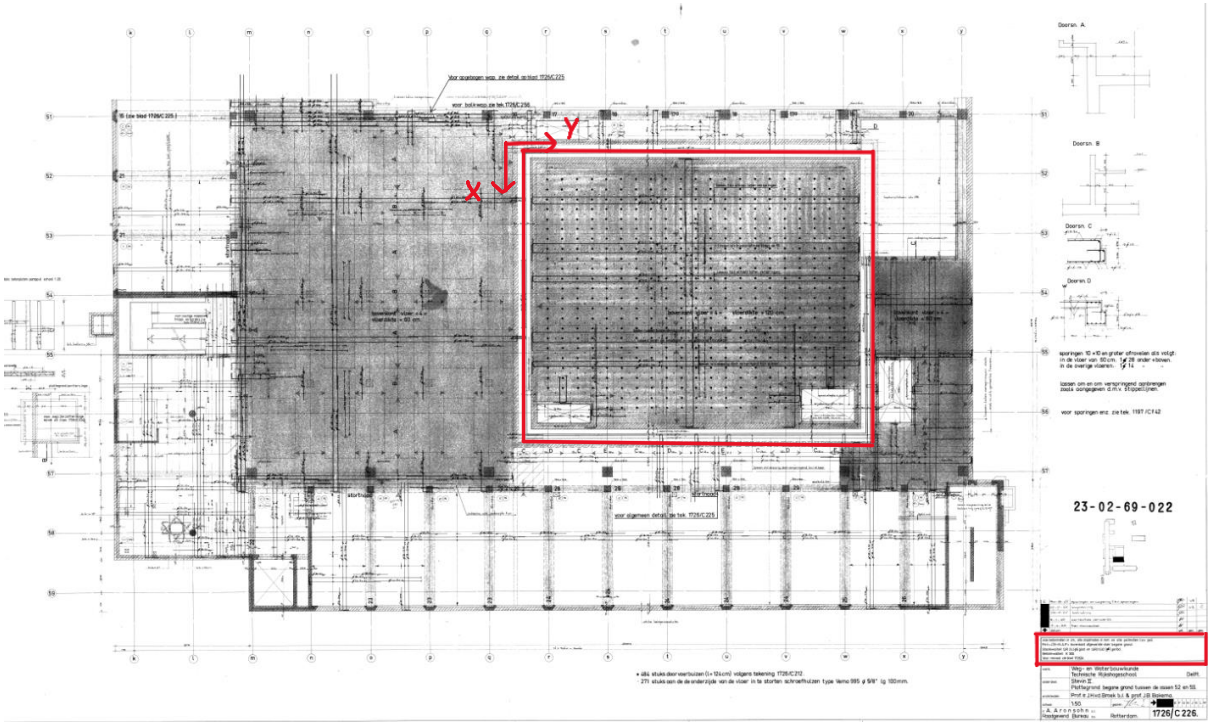
De snelheid en de massa van de explosieven zijn weergegeven in tabel 1 en de massa van de vloer wordt berekend in hoofdstuk 5.2. De snelheid na impact zal als beginvoorwaarde mee worden gegeven in het model van het massa-veersysteem in hoofdstuk 5.

4. Buiging

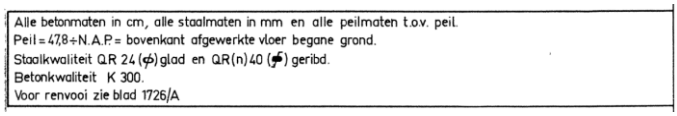
Om te berekenen bij welke explosieven de vloer van het Stevin II lab zal bezwijken wordt er gekeken naar de momentcapaciteit van de vloer op basis van buiging.

4.1 Eigenschappen vloer

De bouwtekeningen van het Stevin II lab zijn gevonden via de Campus Real Estate & Facility Management. Uit deze bouwtekeningen zijn de afmetingen van de vloer en kolommen, de betonsterkteklasse en de hoeveelheid wapening af te lezen. Het deel van de vloer dat wordt onderzocht in dit rapport is rood omrand. De bouwtekening is ook in bijlage 1 te vinden.



Figuur 2: Bouwtekening van de begane grondvloer van het Stevin II lab tussen assen 52 en 59 met getekend assenstelsel. Het roodomrande deel is het stuk vloer waarnaar gekeken wordt in dit onderzoek.


Alle betonmaten in cm, alle staalmaten in mm en alle peilmaten t.o.v. peil.
Peil = 47,8 + N.A.P. = bovenkant afgewerkte vloer begane grond.
Staalkwaliteit Q.R 24 (ϕ) glad en Q.R(n)40 (ϕ) geribd.
Betonkwaliteit K 300.
Voor renvooi zie blad 1726/A

Figuur 3: Specificaties van begane grondvloer Stevin II lab tussen assen 52 en 59, gehaald uit de bouwtekening van de begane grondvloer van het Stevin II lab.

In de bouwtekening is te zien dat de vloer gemaakt is van beton met klasse K300. Dit is ongeveer gelijk aan de huidige betonklasse C19/22 (Nederlandse Vereniging van Journalisten, z.d.).

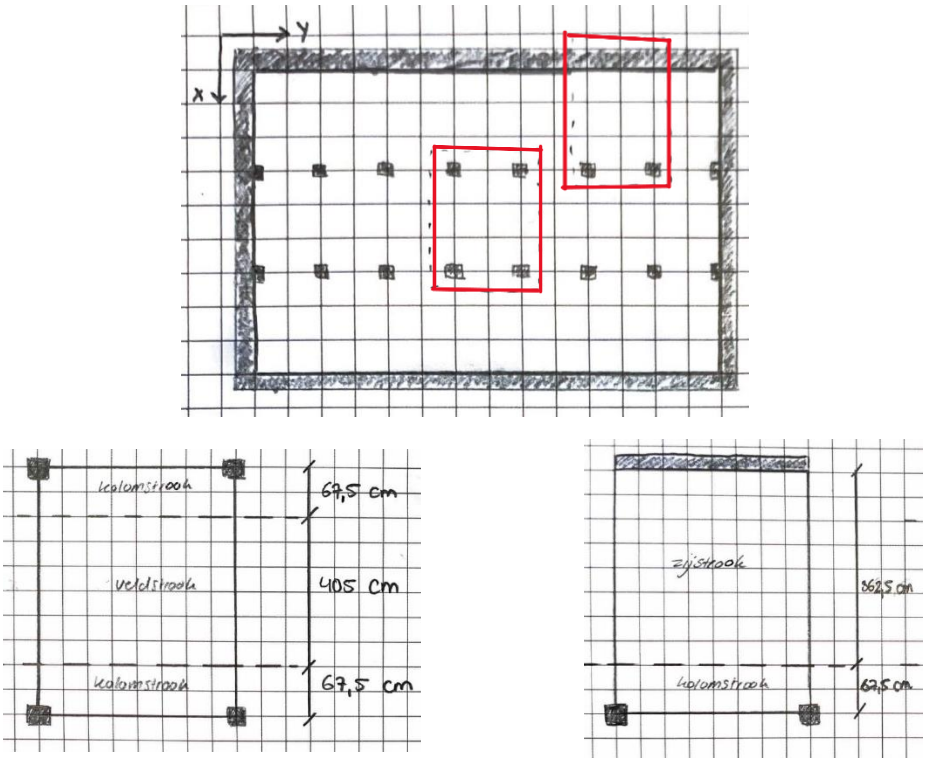
De staalsoort die is gebruikt voor de wapening in het te onderzoeken deel van de vloer heeft een sterkteklasse van QR40, wat betekent dat het een f_{yk} heeft van 400 MPa (Van Wijngaarden, 2017).

De dikte van de vloer is 1.2 meter. Deze is zo dik omdat er staal- en betonproeven worden uitgevoerd op de vloer, waardoor deze een grote weerstand moet kunnen bieden tegen de krachten die vrijkomen bij die proeven.

Tabel 4: Algemene eigenschappen begane-grondvloer Stevin II lab

fyk [MPa]	400
fck [MPa]	19
h [mm]	1200
α [-]	0.75
β [-]	0.389
ε_{c3} [-]	0.175 %

Bij de berekening van de momentcapaciteit is er uitgegaan van een vlakke plaatvloer, ondersteund op kolommen. Aan de zijkanten zit een muur waarop de vloer scharnierend is opgelegd. Er zal worden gerekend met kolomstroken en veldstroken om de momentcapaciteit en de stijfheid van de vloer te bepalen.



Figuur 4: nette schetsen van verdeling veld-, kolom- en zijstroken in y-richting voor twee verschillende delen van de vloer, met maten in cm.

De wapening is afgelezen uit de bouwtekening en in tabel 5 gezet. De vloer is ingedeeld in veld-, kolom- en zijstroken in de y-richting van het getekende assenstelsel. De zijstrook is gedefinieerd als de strook die is opgelegd op de muur. Op deze manier is er een overzicht gecreëerd van welke wapening zich waar bevindt, waar vervolgens de berekeningen op zijn gebaseerd. De maten van de vloer zijn uit de bouwtekeningen in bijlage 1 gehaald.

Tabel 5: eigenschappen van de verschillende stroken met de verdeling van de wapening in y-richting

	Zijstrook	Kolomstrook	Veldstrook
Lengte strook (m)	3.625	2 x 0.675	4.05
Breedte strook (m)	2.7	2.7	2.7
Bovenwapening			
Dekking (mm)	20 + 32	20 +32	20 + 32
Type wapening (mm-cm)	22-15	26-15	22-15
Onderwapening			
Dekking (mm)	25+32	25 + 32	25 + 32
Type wapening (mm-cm)	22-15	26-15	22-15

4.2 Berekening momentcapaciteit

Het uiterst opneembare moment van een doorsnede belast op buiging kan worden berekend met de volgende formules (Braam & Lagendijk, 2011, p.62):

$$M_{P_l} = A_s \cdot f_{yd} \cdot (d - \beta x_u)$$

$$x_u = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{\alpha \cdot b \cdot f_{cd}}$$

Vervolgens wordt hier de stijfheid uit bepaald aan de hand van de volgende formules (Braam & Lagendijk, 2011, p.85-91):

$$EI = \frac{M}{\kappa}$$

$$\kappa = \frac{\varepsilon_{c3} + \varepsilon_s}{d}$$

$$\varepsilon_s = \frac{d - x_u}{x_u} \cdot \varepsilon_{c3}$$

Hier is M_{pl} het plastisch moment, A_s de oppervlakte van het wapeningsstaal, f_{yd} de vloeisterkte van het staal, f_{cd} de druksterkte van het beton, d de nuttige hoogte van de doorsnede, x_u de hoogte van de betondrukzone, EI de stijfheid, κ de kromming, ε_s de rek van het staal, b de breedte van de doorsnede en α en β zijn constanten.

Op deze manier is voor elke strip apart de stijfheid berekend. Een overzicht van de berekende waardes wordt gegeven in tabel 6. In bijlage 2 is een uitwerking van de berekening voor de stijfheid EI voor de kolomstrook te zien.

Voor de kolomstrook is er alleen gekeken naar de bovenwapening; voor de zijstrook en veldstrook is er gekeken naar de onderwapening. Dit is gedaan omdat hier de grootste momenten zullen plaatsvinden.

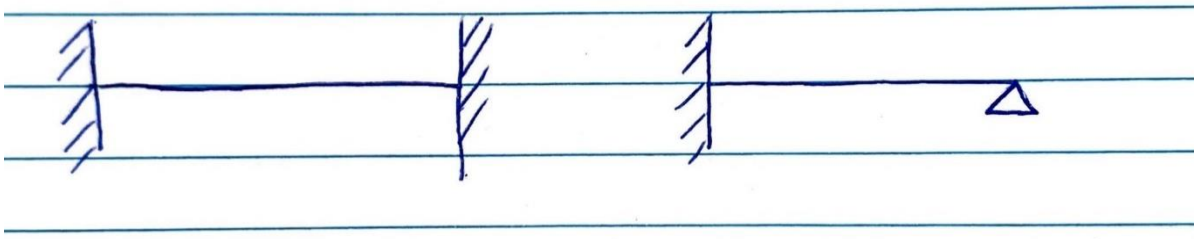
Tabel 6: berekende waardes van momentcapaciteit en stijfheid voor elke strook in y-richting

	Zijstrook	Kolomstrook	Veldstrook
d [mm]	1132	1135	1132
A_s [mm²/m]	2534	3540	2534
x_u [mm]	92.8	129.6	92.8
M_{Pl} [kNm/m]	**966.0**	**1335.3**	**966.0**
κ [1/mm]	0.000019	0.000014	0.000019
EI [kNm²/m]	**$5.12 * 10^4$**	**$9.89 * 10^4$**	**$5.12 * 10^4$**

4.3 Berekening doorbuiging bij plastische scharnieren

Na het berekenen van de stijfheid en het maximale opneembare moment wordt er gekeken naar wat er gebeurt met de vloer als deze richting bezwijken komt. Dit wordt gedaan door gebruik te maken van de plasticiteitstheorie. Er wordt gekeken naar wanneer de vloer de plastische momentcapaciteit bereikt waardoor deze verandert in een mechanisme. Zodra dit gebeurt zit er geen veercapaciteit meer in de vloer en zal deze niet meer geschikt zijn om als dak voor een schuilkelder te dienen.

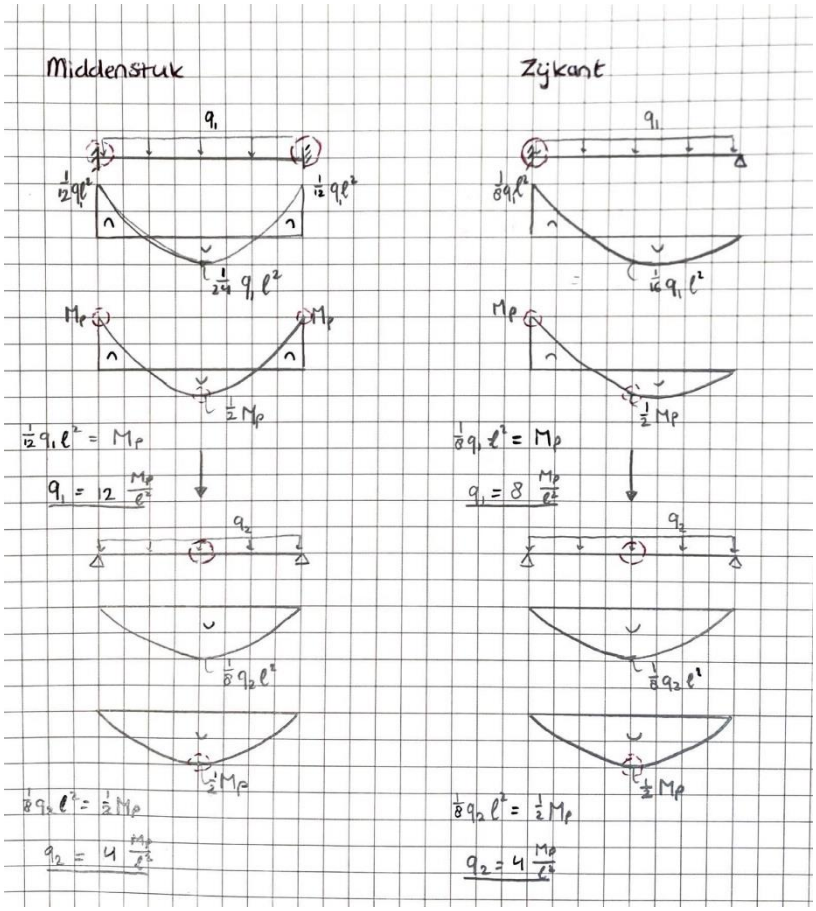
De mechanismes zullen als eerste optreden in x-richting, aangezien de krachten als eerste in deze richting zullen worden afgedragen en de overspanning in x-richting groter is. In de x-richting kunnen er twee stukken van de vloer onderscheiden worden, het middenstuk en de zijkant. Deze kunnen allebei op een andere manier worden geschematiseerd, zoals in een tekening hieronder te zien is. Het middenstuk van de vloer, het stuk tussen de kolommen, kun je schematiseren als een ligger die aan beide kanten is ingeklemd, en de zijkant van de vloer, het stuk tussen de kolommen en de muur, is te schematiseren als een ligger die aan een kant is ingeklemd en een kant scharnierend is opgelegd.



Figuur 5: schematisering van de twee te onderscheiden delen van de vloer, waarbij de linker tekening het middenstuk voorstelt en de rechter tekening de zijkant van de vloer.

De plastische scharnieren zullen als eerste ontstaan bij de inklemmingen. Hierna zal een nieuw mechanicaschema kunnen worden getekend met scharnierende opleggingen aan beide kanten (de inklemmingen zijn immers scharnierend geworden), waarna het laatste scharnier in het midden van de ligger zal ontstaan. Vervolgens is per mechanicaschema de maatgevende belasting berekend, waarna de maximale doorbuiging is berekend.

De berekeningen voor de maatgevende belasting zijn te zien in het overzicht hieronder.



Figuur 6: Overzicht van berekening maximale belasting op het middenstuk en de zijkant van de vloer. De totale maximale belasting is q1 en q2 bij elkaar opgeteld.

In het overzicht zijn de belastingen nog niet bij elkaar opgeteld voor beide situaties omdat deze apart moeten worden meegenomen in de berekening van de doorzakking. Deze wordt namelijk berekend aan de hand van vergeet-me-nietjes. Deze zijn voor beide situaties voor het eerste mechanicaschema anders dan voor de tweede, waardoor je de doorzakkingen voor beide belastingen per schema bij elkaar op moet tellen aan het einde.

Voor het middenstuk is de doorbuiging waarbij deze volledig plastisch is:

$$w_{pl,mid} = \frac{1}{384} \cdot \frac{q_{1,mid} \cdot {l_{mid}}^4}{EI_{kolom}} + \frac{5}{384} \cdot \frac{q_{2,mid} \cdot {l_{mid}}^4}{EI_{veld}}$$

$$\text{met } q_1 = \frac{12\, M_{Pl,kolom}}{{l_{mid}}^2} \text{ en } q_2 = \frac{4\, M_{Pl,veld}}{{l_{mid}}^2}$$

Voor de zijkant is de doorbuiging waarbij deze volledig plastisch is:

$$w_{pl,zij} = \frac{1}{192} \cdot \frac{q_{1,zij} \cdot {l_{zij}}^4}{EI_{kolom}} + \frac{5}{384} \cdot \frac{q_{2,zij} \cdot {l_{zij}}^4}{EI_{zij}}$$

$$\text{met } q_1 = \frac{8\, M_{Pl,kolom}}{{l_{zij}}^2} \text{ en } q_2 = \frac{4\, M_{Pl,zij}}{{l_{zij}}^2}$$

Verschillende waardes voor M_{Pl} en EI zijn gebruikt, afhankelijk van de locatie waar het plastisch scharnier zich zal vormen. De waardes voor M_{Pl} en EI zoals ze hierboven zijn berekend zijn nog maal de breedte van de stroken gedaan, zodat ze de juiste eenheid (kNm) hebben.

De uiteindelijke waardes voor de plastische doorbuiging voor het middenstuk en de zijkant zijn weergegeven in tabel 7.

Tabel 7: Waardes voor belasting en plastische doorbuiging bij vorming van plastische scharnieren.

	Zijkant vloer	**Middenstuk vloer**
Lengte [m]	4.3	5.4
q_1 [kN/m]	1560	1484
q_2 [kN/m]	564	358
w_{pl} [mm]	**77.1**	**110.6**

In bijlage 2 is een voorbeeld gegeven voor de berekening van de doorbuiging van het middenstuk voordat de vloer zal veranderen in een mechanisme.

Omdat het ontstaan van de plastische scharnieren in twee fases gaat is de stijfheid van de vloer eigenlijk verschillend in die twee fases. Omdat dit erg lastig mee te nemen bleek in het massa-veersysteem is er voor gekozen dit te versimpelen. Het ontstaan van de plastische scharnieren wordt nu gezien als een systeem dat in een keer verzwakt en bezwijkt. Dit betekent dat de berekende maximale doorbuiging eigenlijk te klein uitvalt ten opzichte van de werkelijkheid, dus deze berekening is een conservatieve aanname.

4.4 Berekening maximale doorbuiging

Nadat de vloer een mechanisme is geworden door de vorming van de plastische scharnieren is deze nog niet direct bezweken. Op het moment dat de plastische scharnieren zijn gevormd is het staal aan het vloeien, maar is het nog niet gebroken. Om te bepalen wat dus de echte maximale doorbuiging is moet er gekeken worden naar wanneer het staal de maximale rek heeft bereikt en dus zal bezwijken.

De maximale rek die het wapeningsstaal in de vloer aankan zonder te breken is gelijk aan 8% (Zhou et al., 2019). Dit betekent dat het staal nadat het is gaan vloeien verder kan uitrekken totdat het 8% van de lengte van het staal rond de scheur heeft bereikt. Hierna zal het gaan breken.

De lengte van het staal waarover de rek zal vormen is twee keer de overdrachtslengte l_t. Dit is de lengte van het wapeningsstaal dat door scheurvorming niet meer gebonden zit aan het beton en daardoor kan beginnen met vervormen. De overdrachtslengte is te berekenen met behulp van de volgende formule (Braam & Lagendijk, 2011):

$$l_t = \frac{1}{4} \cdot \frac{f_{ctm} \cdot \emptyset}{\tau_{bm} \cdot \rho}$$

Hierbij is ϕ de diameter van het wapeningsstaal, f_{ctm} de treksterkte van het beton, τ_{bm} de sterkte van de bond tussen het staal en het beton, en ρ de waarde van het wapeningspercentage van de doorsnede.

Voor het bepalen van f_{ctm} en τ_{bm} moet er gekeken worden naar in welke fase het beton zich bevindt. In tabel 8 is te zien wat het verband tussen deze twee is voor verschillende fases. In dit geval is er een dynamische belasting aanwezig en kijken we naar de gestabiliseerde scheurfase. Het gaat om deze fase omdat er wordt gekeken naar het moment dat de scheuren zich al hebben gevormd en het staal zal breken. Dit betekent dat:

$$\frac{f_{ctm}}{\tau_{bm}} = \frac{1}{2.0}$$

Tabel 8: waardes voor τ_{bm} bij verschillende condities (Technische Universiteit Delft, z.d.)

	crack formation stage	stabilized cracking stage
Short term loading	$\alpha = 0{,}5$ $\beta = 0$ $\tau_{bm} = 2{,}0\, f_{ctm}$	$\alpha = 0{,}5$ $\beta = 0$ $\tau_{bm} = 2{,}0\, f_{ctm}$
long term or dynamic loading	$\alpha = 0{,}5$ $\beta = 0$ $\tau_{bm} = 1{,}6\, f_{ctm}$	$\alpha = 0{,}3$ $\beta = 1$ $\tau_{bm} = 2{,}0\, f_{ctm}$

Er wordt gekeken naar de doorbuiging in de x-richting van de vloer, dus moet ook de wapening in de x-richting worden meegenomen. In de x-richting heeft de vloer twee verschillende soorten wapening; een met een diameter van 32 mm op een hart-op-hart-afstand van 30 cm en een met een diameter van 28 mm op een hart-op-hart-afstand van 30 cm. Deze liggen zowel boven als onder, en liggen om en om, zodat er netto om de 15 cm een wapeningsstaaf ligt. Voor de berekeningen zal de wapeningsstaaf van 28 mm worden meegenomen, omdat deze, doordat deze dunner is, sneller zal bezwijken.

Voor de berekening van ρ wordt een stuk vloer met een breedte van 1.2 meter genomen, zodat er evenveel staven van 28 mm als 32 mm zich in het stuk zullen bevinden. Op deze manier wordt het wapeningspercentage voor de gehele breedte van de vloer berekend, gebruikmakend van de volgende formule:

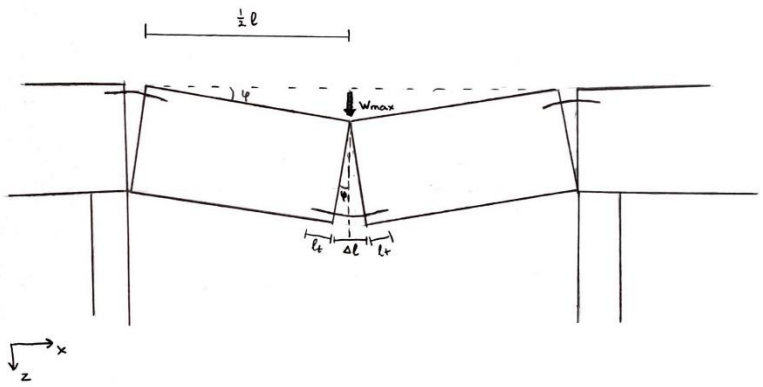
$$\rho = \frac{A_s}{A_c}$$

De waarde van l_t is hetzelfde voor beide delen van de vloer, aangezien ze beiden dezelfde wapening hebben in x-richting.

Tabel 9: Berekende waardes voor het wapeningspercentage en de overdrachtslengte. Deze zijn voor beide delen van de vloer gelijk.

	Zijkant vloer	**Middenstuk vloer**
Diameter ϕ [mm]	28	28
ρ [%]	0.394	0.394
l_t [mm]	**887.3**	**887.3**

Om vervolgens de maximale doorzakking te kunnen berekenen wordt er gekeken naar de verlenging van de wapeningsstaaf. Er wordt aangenomen dat er een enkele grote scheur zal ontstaan bij het bezwijken van de vloer, dus op die manier kan de hoek waarmee het beton open zal staan berekend worden, waarna er met diezelfde hoek de maximale doorzakking berekend kan worden, zie figuur 7.



Figuur 7: Tekening van maximale doorbuiging w_{max} met factoren die meespelen erin.

Zoals in figuur 7 te zien is zijn er ook plastische scharnieren gevormd boven de kolommen. Er wordt echter alleen gekeken naar het plastische scharnier dat in het midden wordt gevormd, omdat deze het meest rekt en dus het eerst zal bezwijken.

Met een maximale rek van 8% zal de verlenging van de wapening gelijk zijn aan:

$$\Delta l = 0.08 * 2 \cdot \ l_t = 142.0\ mm$$

De maximale doorzakking is bij het middenstuk anders dan bij de zijkant; dit heeft te maken met de verschillende lengtes van de vloerdelen. Voor de berekening van de maximale doorzakking wordt gebruikgemaakt van de volgende formule:

$$w_{max} = \frac{0.5 \cdot \Delta l}{h} \cdot 0.5 \cdot l_{vloer}$$

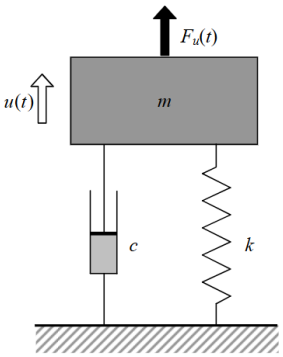
Met een hoogte van 1.2 meter voor beide vloerdelen is de maximale doorzakking berekend. Deze is te vinden in tabel 10.

Tabel 10: Maximale doorzakking vloer, gebruikmakend van de maximale rek in het wapeningsstaal. De maximale doorbuiging is per vloerdeel anders door de verschillende lengtes van de vloerdelen.

	Zijkant vloer	**Middenstuk vloer**
Lengte vloer [m]	4.3	5.4
w_{max} [mm]	**254**	**320**

5. Massa-veersysteem

De vloer van het Stevin II lab kan worden gemodelleerd als een enkelvoudig massa-veersysteem. Dit zorgt ervoor dat er kan worden getest wat er met de vloer gebeurt zodra een explosie zou vallen op de vloer.



Figuur 8: Afbeelding van eenvoudig geschematiseerd massa-veersysteem (Blaauwendraad, 2016)

Een massa-veersysteem heeft de volgende formule (Blaauwendraad, 2016, p.54):

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = F_u$$

In deze formule is m gelijk aan de massa die zal bewegen in het systeem, staat c gelijk aan de demping die in het systeem is opgelegd en is k gelijk aan de veerconstante van de gemodelleerde veer in het massa-veersysteem. F_u is de kracht van buitenaf die zorgt voor de beweging u van het systeem.

5.1 Stijfheid

Voor het bepalen van de stijfheid k wordt gekeken naar de manier waarop de vloer is opgelegd. Net als in hoofdstuk 4.3. kun je de vloer opdelen in een middenstuk en een zijkant. Dezelfde schematisering wordt hiervoor gebruikt, zie figuur 5.

Voor deze situaties zijn er vergeet-me-nietjes waarmee je de doorbuiging in het midden van de balk kan berekenen in het geval er een puntlast in het midden wordt geplaatst. Dit is tevens de maximale doorbuiging voor de situatie met een puntlast. Deze doorbuiging kan worden omgeschreven naar een veerstijfheid, aangezien geldt dat:

$$F = k \cdot u$$

Voor de dubbel ingeklemde ligger geldt het vergeet-me-nietje:

$$u = \frac{1}{192} \cdot \frac{FL^3}{EI}$$

Voor de enkel ingeklemde ligger geldt het volgende vergeet-me-nietje:

$$u = \frac{7}{768} \cdot \frac{FL^3}{EI}$$

Om te bepalen wat de veerstijfheid van de vloer is wordt er gekeken naar hoe de krachtafdracht loopt. De vloer heeft een krachtafdracht in twee richtingen, waarvan een dominant is, in dit geval de x-richting. De krachten zullen eerst worden afgedragen in x-richting naar de kolomstroken en opleggingen, en vervolgens in y-richting naar de kolommen.

Als er een kracht in het midden van het zijstuk van de vloer wordt gezet zullen er twee componenten meespelen in de doorbuiging van het midden, namelijk de doorbuiging van de vloer in x-richting, en de helft van de doorbuiging van de kolomstrook die in y-richting zal doorbuigen.

Voor de doorbuiging in het midden van het middenstuk van de vloer wordt ook de doorbuiging in x-richting meegenomen, maar omdat de vloer twee kolomstroken heeft bij dit deel van de vloer wordt voor de doorbuiging in het midden de volledige doorbuiging in y-richting meegenomen.

In bijlage 2 staat een toelichting voor de berekening van k voor beide delen van de vloer.

Voor de stijfheid van de zijkant van de vloer geldt dus:

$$k_{zijkant} = \frac{F}{\frac{7 \cdot F \cdot {L_{zij}}^3}{768 \cdot EI_{zij}} + \frac{\frac{11}{16} F \cdot {L_{kolom}}^3}{2 \cdot 192 \cdot EI_{kolom}}}$$

en voor het middenstuk:

$$k_{midden} = \frac{F}{\frac{F \cdot {L_{veld}}^3}{192 \cdot EI_{veld}} + \frac{0.5 \cdot F \cdot {L_{kolom}}^3}{192 \cdot EI_{kolom}}}$$

Hierbij worden de stijfheden EI nog maal de breedte gedaan zodat de veerstijfheid in kN/m uitkomt. Voor de veld- en zijstrook wordt hier de breedte van het stuk vloer tussen de kolommen, 2.7 meter, aangenomen en voor de kolomstrook wordt de breedte van de strook gebruikt, namelijk 2 x 0.675 meter. Hierdoor kom je met alle ingevulde waardes voor de stijfheid van het middenstuk van de vloer uit op:

$$k_{midden} = \frac{1}{\frac{5.4^3}{192 \cdot 51218 \cdot 2.7} + \frac{0.5 \cdot 2.7^3}{192 \cdot 66745 \cdot 1.35}} = 158366\ kN/m$$

Tabel 11: samenvatting van gegevens van zijkant en middenstuk vloer, inclusief de veerconstante k.

	Zijkant vloer	**Middenstuk vloer**
Lengte (x-richting) [m]	4.30	5.40
Breedte (y-richting) [m]	2.70	2.70
k [kN/m]	**181677**	**158366**

Zodra de vloer echter meer doorzakt dan de plastische doorbuiging w_{pl} (berekend in hoofdstuk 4.3), is de vloer een plastisch scharnier geworden en zal de wapening beginnen met vloeien. Dit betekent dat na het bereiken van de plastische doorbuiging geen elastisch gedrag meer zal vertonen en dus niet meer zal terug proberen te vinden. De veerconstante k is dus na het bereiken van deze doorbuiging gelijk aan 0.

5.2 Massa

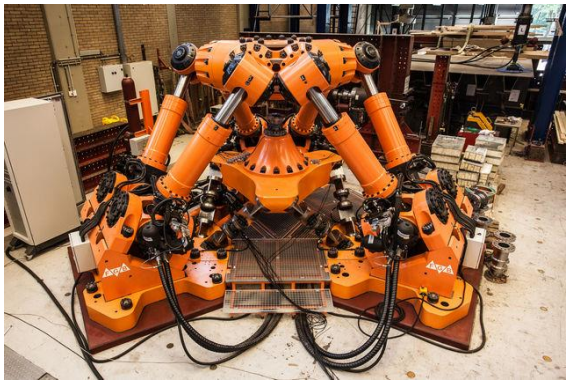
Voor de berekening van de massa wordt er gekeken naar de statische belasting op de vloer en de massa van de raket die hier bovenop komt. Voor de statische belasting wordt de massa berekend voor de breedte van de stukken vloer in y-richting, 2.7 m, over de volledige lengte in x-richting van de zijkant of het middenstuk. Het volledige vloerdeel wordt dus meegenomen. Dit zal in de praktijk wat lager liggen, maar er is gekozen om in dit verslag een versimpelde aanname te doen over welk deel van de vloer precies moet worden meegenomen als massa van het massa-veersysteem. Hierdoor zal de weerstand van de vloer in het model iets hoger uitkomen dan in de praktijk.

De formule voor het statische deel van de massa is:

$$m_{stat} = q_d \cdot A \cdot g$$

Om q_d te kunnen berekenen moet het eigen gewicht van het beton worden meegenomen en moet worden geschat wat de variabele belasting is die op de vloer staat.

Voor het eigen gewicht wordt er gekeken naar de dikte van de vloer en het gewicht van beton. Het soortelijk gewicht van gewapend beton is ongeveer gelijk aan 2500 kg/m^3 (Uniebouw Webshops B.V. [Bouwbestel], z.d.). Met een vloer van 1.2 m dik betekent dit dat de permanente belasting gelijk is aan 30 kN/m^2.



Figuur 9: een van de grootste belastingen op de vloer van het Stevin II lab, de Hexapod (TU Delft, z.d.).

Voor de variabele belasting wordt er gekeken naar wat voor soort machines op de vloer staan. Zo moet de vloer bijvoorbeeld de Hexapod dragen, die op zichzelf al 60.000 kg weegt (Hoving, z.d.). Deze staat op een oppervlakte van ongeveer 30 m^2. De belasting ten gevolge van deze machine is dus 600 kN / 30 m^2 = 20 kN/m^2. De hele vloer moet dit gewicht aankunnen, dus er wordt uitgegaan van een variabele belasting van 20 kN/m^2.

We zullen kijken naar de uiterste grenstoestand (UGT) aangezien we de vloer testen op bezwijken. In dit geval moet voor de belastingcombinatie de factor 1.2 mee worden genomen voor de permanente belasting en de factor 1.5 voor de variabele belasting.

Dit resulteert in een belastingcombinatie q_d van:

$$q_d = 1.2 \cdot 30 + 1.5 \cdot 20 = 66\ kN/m^2$$

De statische massa's van het zij- en middenstuk zijn dus:

$$m_{stat,zij} = 66 \cdot 2.7 \cdot 4.30 \cdot 10 = 7662.6\ kg$$

$$m_{stat,mid} = 66 \cdot 2.7 \cdot 5.4 \cdot 10 = 9622.8\ kg$$

Hier komt het gewicht van elke raket nog bij, dus per raket wordt gerekend met een aparte massa voor het massa-veersysteem. Dit omdat ervan uit wordt gegaan dat de explosieven bij inslag blijven zitten op de vloer en dus ook als massa werken in het systeem. Deze waardes zijn in tabel 12 te vinden.

Tabel 12: Tabel met berekende massa's van het middenstuk en de zijkant, inclusief explosieven.

	Massa (kg)	Totale massa zijkant (kg)	Totale massa middenstuk (kg)
Artilleriegranaat	20	7682.6	9642.8
Shahed-drone	200	7962.6	9922.8
Zweefbom	500	8162.6	10122.8
Kruisraket	1200	8962.6	10922.8
Ballistische raket	2500	10162.6	12122.8
Grote zweefbom	3000	10662.6	12622.8

5.3 Demping

De vloer heeft naast een veerconstante ook een dempingsfactor waar rekening mee moet worden gehouden in het opstellen van het model. Voor het berekenen van de dempingsfactor wordt de volgende formule gebruikt (Blaauwendraad, 2016):

$$c = \zeta \cdot 2\sqrt{k \cdot m}$$

Hier wordt voor de dempingsratio ζ de waarde 0.05 genomen (Cao et al., 2018). Per raket en per vloer zal de dempingsfactor verschillen. De waardes voor de dempingsfactor zijn weergegeven in tabel 13.

Tabel 13: Tabel met waardes van de dempingsfactor per stuk vloer voor elke granaat, gegeven in 1000 kg/s.

	Dempingsfactor zijkant (1000 kg/s)	Dempingsfactor middenstuk (1000 kg/s)
Artilleriegranaat	118.1	123.6
Shahed-drone	119.5	124.7
Zweefbom	121.8	126.6
Kruisraket	126.9	130.9
Ballistische raket	135.9	138.6
Grote zweefbom	139.2	141.4

Een voorbeeld van de berekening voor de dempingsfactor voor de artilleriegranaat voor de zijkant is hieronder uitgeschreven. Hierbij wordt k in kN/m genomen en m in 1000 kg.

$$c = 0.05 \cdot 2\sqrt{181677 \cdot 7.6826} = 118.1 \cdot 1000\ kg/s$$

5.4 Oplossen van systeem

Het oplossen van het massa-veersysteem wordt met een numerieke methode gedaan in Python. De gekozen methode hiervoor is de voorwaartse Euler-methode. De voorwaartse Euler-methode wordt als volgt geschreven:

$$w_{n+1} = w_n + \Delta t \cdot f(t_n, w_n)$$

Hierbij is $f(t_n, w_n)$ de verandering van de functie y op het tijdstip t_n en is w_{n+1} de benadering van de functie y op het tijdstip t_{n+1}.

In het geval van dit onderzoek heb je de vergelijking van ons massa-veersysteem:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = F_u$$

Deze kun je omschrijven zodat je een vergelijking krijgt voor de versnelling ü van de vloer op tijdstip t_n:

$$\ddot{u}_n = (F_u - c\dot{u} - ku)/m$$

Met de voorwaartse Euler-methode kun je nu een benadering doen voor de snelheid op tijdstip t_{n+1}:

$$\dot{u}_{n+1} = \dot{u}_n + \Delta t \cdot \ddot{u}_n$$

Vervolgens kun je hiermee een benadering doen voor de doorzakking op tijdstip t_{n+1}:

$$u_{n+1} = u_n + \Delta t \cdot \dot{u}_n$$

Op het tijdstip t = 0 geldt dat de doorzakking gelijk is aan 0. De snelheid zal gelijk zijn aan de snelheid die is overgedragen door middel van behoud van impuls. Deze is per explosief

verschillend, maar is hieronder uitgewerkt voor de artilleriegranaat als deze inslaat aan de zijkant van de vloer:

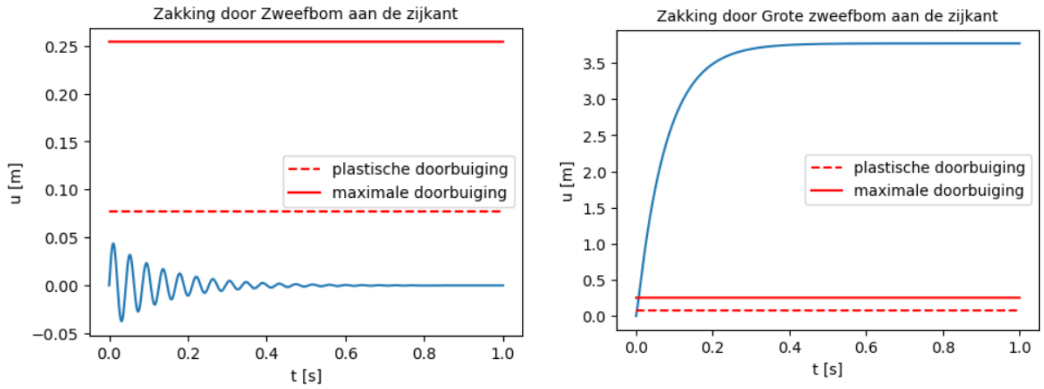
$$v_{begin,a.g.} = \frac{(m_{a.g.} \cdot v_{a.g.} + m_{vloer} \cdot v_{vloer})}{(m_{a.g.} + m_{vloer})}$$

$$v_{begin,a.g.} = \frac{20 \cdot 3.5 + 7662.6 \cdot 0}{20 + 7662.6} = 0.00911\ m/s$$

De lineaire kracht die ontstaat bij de drukgolf wordt toegepast over een tijdsperiode die gelijkstaat aan de tijdsduur van de positieve drukgolf. De code van het python-model is te vinden in bijlage 3.

5.5 Resultaten

Na het toevoegen van alle elementen in het model van het massa-veersysteem blijkt dat de helft van de explosieven de vloer zal doen bezwijken en de andere helft niet. De beste voorbeelden zijn hieronder weergegeven. De zweefbom is het explosief dat het dichtst bij bezwijken komt van de 'veilige' bommen en de grote zweefbom is het explosief dat het dichtst bij niet bezwijken komt van de 'onveilige' bommen. Hierbij is alleen gekeken naar de zijkant van de vloer, omdat deze maatgevender bleek te zijn. Alle andere grafieken zijn te zien in bijlage 4.

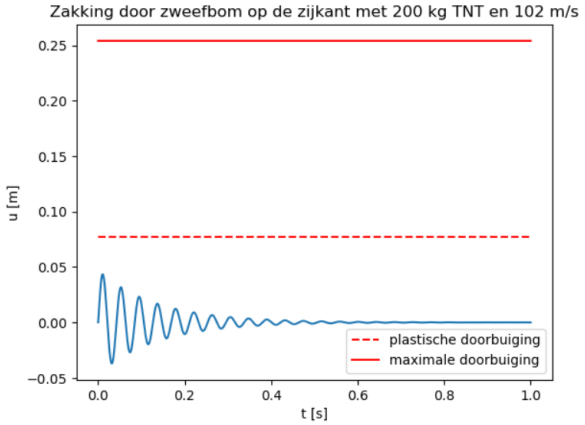


Figuur 10: Grafieken van doorbuiging vloer zijkant door zweefbom en grote zweefbom. De vloer is bij de zweefbom niet bezweken en oscilleert weer terug naar de originele stand, en bij de grote zweefbom is deze bezweken.

In de grafiek van de zweefbom is te zien dat de inslag zorgt voor een oscillerende beweging van de vloer. Door de dempingsfactor wordt de amplitude van de golfbeweging steeds kleiner, waardoor de vloer na een paar tiende van een seconde weer in zijn evenwichtsstand terechtkomt. Bij de grote zweefbom is te zien dat de piek van de eerste golfbeweging een grotere doorbuiging zou geven dan de plastische doorbuiging w_{pl}. Hierdoor wordt de veerstijfheid k gelijk aan 0 en zakt de vloer plastisch door. Deze zakking is zodanig groot dat de vloer ook de maximale zakking overschrijdt en theoretisch een doorzakking van meer dan 3.5 meter zal bereiken. Dit betekent dus dat de vloer in het geval van de grote zweefbom na nog geen 0.05 seconden zou bezwijken.

Er zou kunnen worden gekeken naar een explosief dat ervoor zorgt dat de vloer net niet zou bezwijken. Dit zou het randgeval zijn voor welke explosieven wel en niet de vloer zullen doen

bezwijken. De factoren waarnaar wordt gekeken zijn het gewicht van het TNT in het explosief en de snelheid waarmee het explosief aankomt op de vloer. Hiervoor wordt de zweefbom genomen als basis, aangezien deze het dichtst bij bezwijken zit. De grafiek van de zweefbom is voor de vergelijking nog een keer hieronder weergegeven.



Figuur 11: Grafiek van zakking zweefbom op de zijkant met de waardes voor de hoeveelheid TNT en de snelheid weergegeven in de titel.

Bij het aanpassen van de hoeveelheid TNT bleek dat de hoeveelheid TNT significant veel moest veranderen voordat deze zou bezwijken. De hoeveelheid TNT in een zweefbom is 200 kg. Aan de hand van vele pogingen is gebleken dat de plastische doorzakking net wordt overschreden bij 4430 kg TNT, en dat de vloer zal bezwijken bij 4660 kg TNT. Het blijkt dus dat zodra de vloer een mechanisme is geworden, deze nog maar een klein zetje nodig heeft voor deze volledig is bezweken, terwijl de vloer best een grote weerstand heeft voordat deze plastisch wordt wat betreft het weerstaan van een drukgolf.

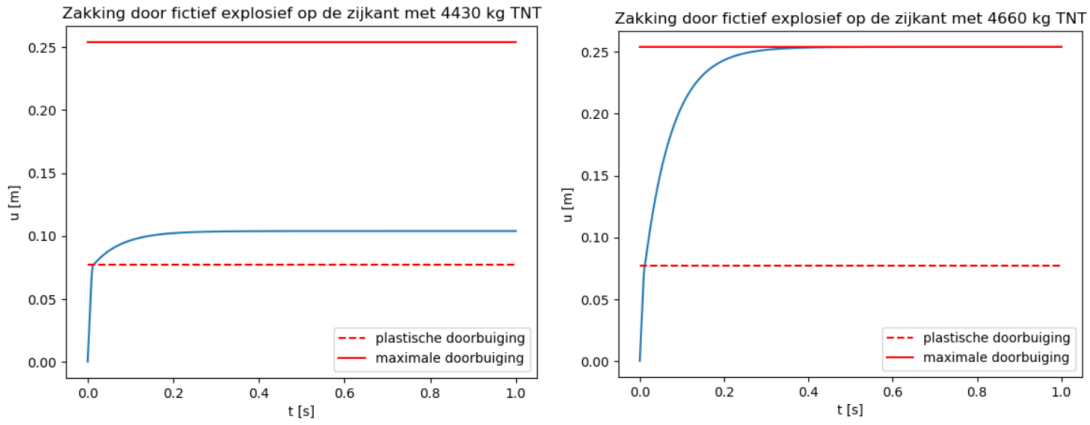


Figure 12: Grafieken van zakking fictief explosief op de zijkant met respectievelijk 4430 kg TNT en 4660 kg TNT. In de linkergrafiek heeft de vloer net de plastische fase bereikt, en in de rechtergrafiek is de vloer net bezweken.

Bij het aanpassen van de snelheid bleek juist dat er minder hoefde te worden aangepast voordat de vloer zou bezwijken. Beginnend bij de waarde van de snelheid voor de zweefbom, 102 m/s, is gebleken door met meerdere waardes te testen dat de vloer in de plastische vervormingsfase zou komen bij een snelheid vna 191 m/s, en dat deze voor het eerst zou bezwijken bij 196 m/s. Ook nu blijkt weer dat er maar heel weinig extra snelheid nodig is om de vloer van een mechanisme te laten bezwijken.

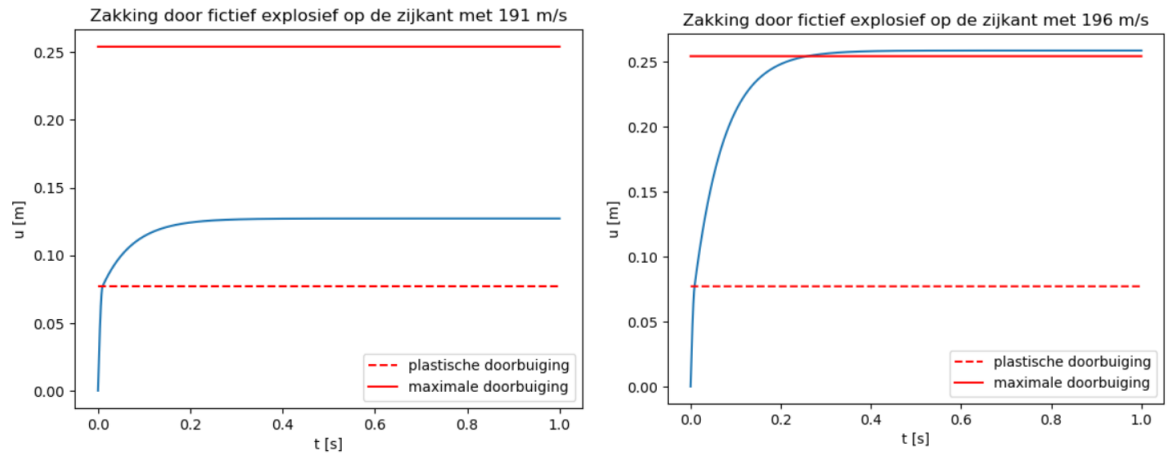


Figure 13: Grafieken van zakking fictief explosief op de zijkant die neerkomt met respectievelijk 191 m/s en 196 m/s. In de linkergrafiek heeft de vloer net de plastische fase bereikt, en in de rechtergrafiek is de vloer net bezweken.

Aan de hand van deze testen is er te zien dat de snelheid waarmee het explosief neerkomt op de vloer veel meer effect heeft op de doorbuiging dan de hoeveelheid TNT die zich in het explosief bevindt.

Als er wordt gekeken naar het effect van demping blijkt dat deze voor kleine hoeveelheden niet de maatgevende factor is in het wel of niet bezwijken van de vloer. Op het huidige moment is er een dempingsratio van 0.05 aangehouden voor het model, maar als er weer wordt gekeken naar het geval met de zweefbom, blijkt dat deze niet bepalend is geweest voor het wel of niet bezwijken.

Er is gekeken naar een situatie zonder demping en een situatie met grotere demping. In het geval van geen demping blijkt dat de piek van de doorbuiging ongeveer gelijk blijft aan de piek met 0.05 dempingsratio, te zien in figuur 11, maar dat de beweging gewoon oneindig doorgaat. In het geval dat er een grotere dempingsratio wordt genomen, bijvoorbeeld 0.20, blijkt dat de piek wel iets kleiner is, maar dat het verschil vooral zichtbaar is in de snelheid waarmee de beweging ophoudt.

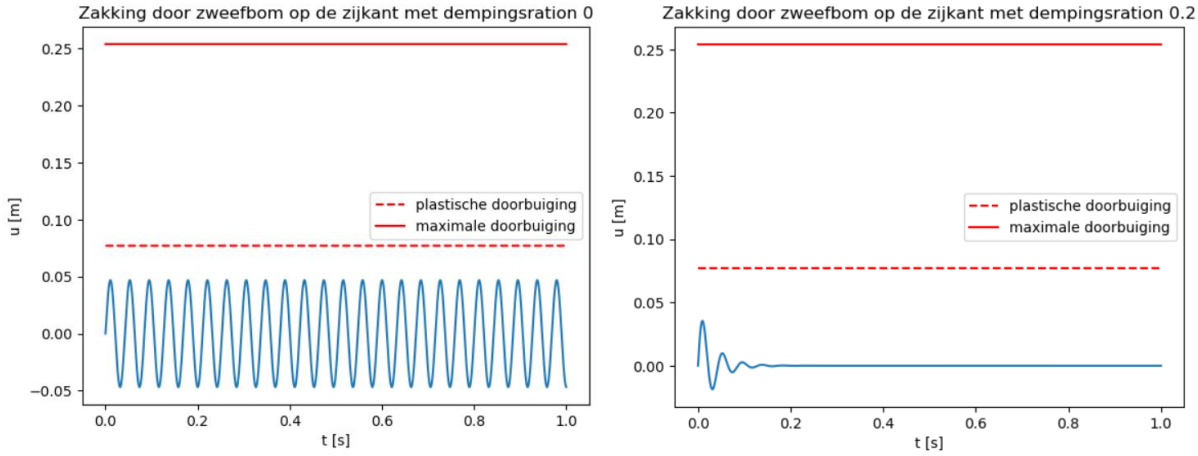


Figure 14: Grafieken van zakking door zweefbom op de zijkant waarbij de vloer een dempingsratio heeft van respectievelijk 0 en 0.20. Het verschil zit met name in de beweging, maar nauwelijks in de maximale doorbuiging door de trilling.

5.6 Controleren van het model

Om te weten of het model geloofwaardig is moet het model worden gecontroleerd. Dit wordt gedaan aan de hand van een controleberekening. De eigenfrequentie zal worden berekend, waarna de periode van het massa-veersysteem kan worden bepaald. Indien deze overeenkomt met de geschreven modellen betekent dit dat het model geloofwaardig is en dat het model gebruikt kan worden om conclusies uit te trekken.

Voor het berekenen van de eigenfrequentie is de volgende formule te gebruiken (Blaauwendraad, 2016):

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Hieruit valt de periode te bepalen met de volgende formule:

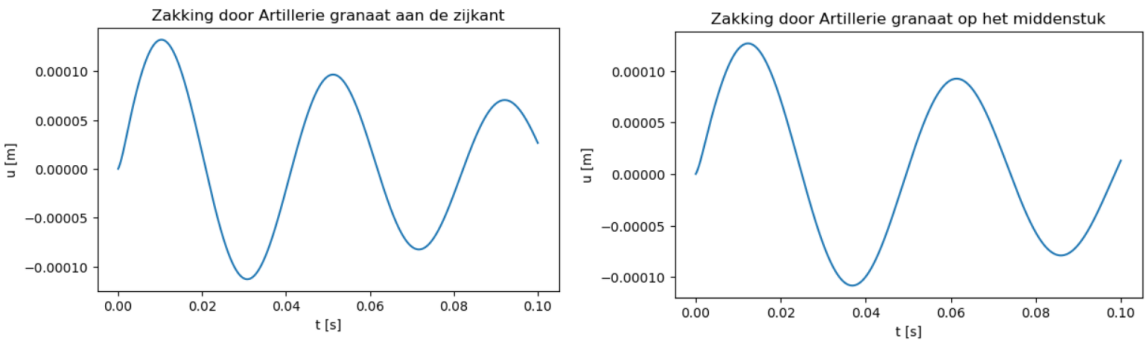
$$T = \frac{2\pi}{\omega_0}$$

De controle wordt uitgevoerd voor de zijkant en het middenstuk indien hier een zweefbom op valt, aangezien bij deze de periode het beste te controleren is.

Tabel 14: Berekende waardes voor de eigenfrequentie en periode van de beweging van de vloer aan de zijkant en bij het middenstuk.

Gegevens voor Zweefbom	**Zijkant vloer**	**Middenstuk vloer**
k [N/m]	$182 * 10^6$	$158 * 10^6$
m [kg]	8162.6	10122.8
ω_0 [rad/s]	149.3	124.9
T [s]	**0.042**	**0.050**

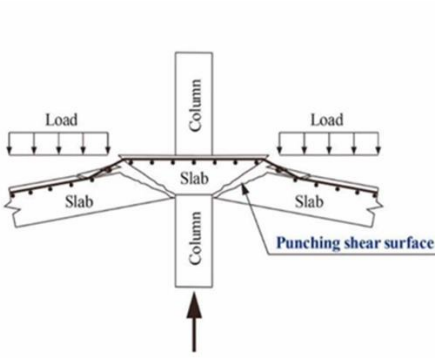
Als je kijkt naar de grafieken komt de berekende periode bijna exact overeen met de periode uit het model. Dit betekent dus dat het model klopt en dat er nuttige conclusies uit kunnen worden getrokken.



Figuur 15: Grafiek van doorzakking door de artilleriegranaat voor beide delen van de vloer. De periode van de golfbeweging is af te lezen en is respectievelijk 0.042 en 0.050 seconde voor de zijkant en het middenstuk.

6. Pons

Bij de sterkteberekeningen van een vloer ondersteund door kolommen moet je niet alleen rekening houden met de momentcapaciteit van de vloer en de maximale doorbuiging, maar ook met het eventueel falen door pons. Pons is een verschijnsel waarbij de vloer rond de kolom begint te scheuren, waarna de vloer om de kolom heen zal inzakken. Dit is erg gevaarlijk dus er moet te allen tijde vermeden worden dat dit verschijnsel zou kunnen optreden bij het ontwerpen van een vloer.



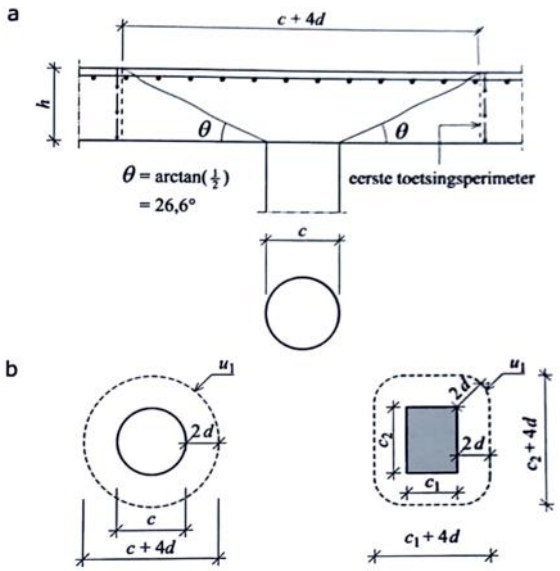
Figuur 16: Schematische tekening van het optreden van pons rondom een kolom (The Essential Guide To Punching Shear | Diales, 2024).

Aangezien in dit rapport wordt onderzocht naar welke explosies de vloer van het Stevin II lab aan zou kunnen, moet er ook worden getest bij welke explosiekracht er pons zal ontstaan. Niet alleen rondom een kolom zou pons kunnen ontstaan, maar ook bij het inslaan van een explosief zou rondom het explosief pons kunnen ontstaan. Voor zowel de kolom als voor de explosieven zal worden getest wat de maximale capaciteit van de vloer is om pons te kunnen weerstaan.

De formule voor de maximale spanning in de vloer rondom de kolom of raket is de volgende (Braam & Lagendijk, 2011):

$$v_{Rd,max} = 05v \cdot f_{cd}$$

$$\text{met } v = 0.6\left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right)$$



Figuur 17: uitleg bij het bepalen van de toetsingsperimeter u1 (Braam & Lagendijk, 2011, p.181

De toegepaste spanning in de vloer bereken je met de volgende formules (Braam & Lagendijk, 2011):

$$v_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{u_1 \cdot d_{eff}}$$

met $u_1 = 2\,(c_1 + c_2) + \pi \cdot 4 \cdot d_{e_{ff}}$ voor een rechthoekige kolom

en $u_1 = \pi \cdot (c + 4 \cdot d_{e_{ff}})$ voor een ronde kolom

en $d_{e_{ff}} = \frac{d_x + d_y}{2}$

Deze bovenstaande formules moeten voor de kolom en elk explosief apart worden berekend, aangezien de afmetingen van een kolom anders zijn dat die van een explosief.

Er wordt getest op falen, dus in dat geval geldt:

$$v_{Ed} \leq v_{Rd,max}$$

Waardoor de maximale kracht op de vloer rondom de kolom mag zijn:

$$V_{max} \leq v_{Rd,max} \cdot u_1 \cdot d_{e_{ff}}$$

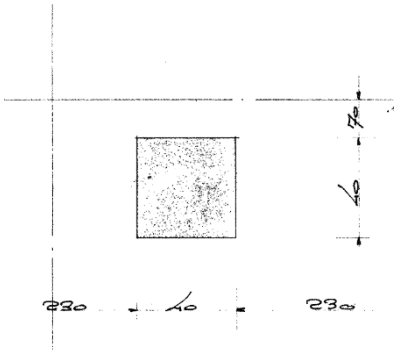
Op basis van de bouwtekeningen die te vinden zijn in bijlage 1 zijn hieronder de belangrijke getallen voor de ponsberekeningen opgeschreven.

Tabel 15: eigenschappen belangrijk voor testen falen door pons.

fck [MPa]	19
h [mm]	1200
dx [mm]	1165
dy [mm]	1135
d_{eff} [mm]	1150
u_1 [mm]	14611

6.1 Pons bij kolom

De kolommen hebben elk een afmeting van 400 x 400 mm, zoals te zien valt in de bouwtekening in bijlage 1.



Figuur 17: deel van bouwtekening van de kolommen van kelder Stevin II lab met de afmetingen

Met deze bouwtekening en eerdere bouwtekeningen over de wapening zijn de volgende berekeningen te maken:

$$u_1 = 4 \cdot 400 + \pi \cdot 4 \cdot 1150 = 16051\ mm$$

Vervolgens is de maximale kracht te berekenen:

$$v_{Rd,max} = 0.5 \cdot 0.6\left(1 - \frac{19}{250}\right) \cdot \frac{19}{1{,}5} = 3.51\ MPa$$

$$V_{max} = 3.51 \cdot 16051 \cdot 1150 = 64813\ kN$$

6.2 Pons bij explosieven

Voor de explosieven wordt per explosief apart de berekening gedaan, omdat elk explosief een andere diameter heeft.

Tabel 16: maximale opneembare dwarskracht van de vloer per explosief.

	Diameter (mm)	**V_{max} (kN)**
Artilleriegranaat	150	60255.5
Shahed-drone	600	65964
Zweefbom	400	63427
Kruisraket	500	64695
Ballistische raket	500	64695
Grote zweefbom	900	69769.5

Een voorbeeld van de berekening voor de artilleriegranaat staat in bijlage 2.

6.3 Bezwijken door pons

Om te kunnen bepalen of de vloer bezwijkt op pons moet de dwarskracht in de vloer worden berekend bij zowel de kolommen als direct rondom het inslaande explosief. Hierbij wordt er gekeken naar de kracht op het moment van inslaan, aangezien deze het grootst zal zijn.

De dwarskracht in de kolommen zal het grootst zijn als de bom op de zijkant inslaat, aangezien het grootste deel van de kracht op dit deel wordt afgedragen naar de kolommen. In bijlage 2 is een schematisch overzicht te zien voor de bepaling van de dwarskracht in de kolommen. De maximale kracht in de kolom is de bijdrage van de statische belasting van de vier aansluitende vloerdelen, dus twee keer de zijkant en twee keer het middenstuk, samen met de belasting van het explosief dat op de zijkant valt. Een voorbeeld van de berekening voor de dwarskracht door het inslaan van de artilleriegranaat staat in bijlage 2.

$$V_{Ed,kolom} = V_{kolom,zij} + V_{kolom,mid}$$

$$V_{Ed,kolom} = \frac{1}{2} \cdot \frac{11}{16} \cdot F_{expl} + 2 \cdot (q_d \cdot \frac{11}{16} l_{x,zij} \cdot \frac{1}{2} l_{y,zij}) + 2 \cdot (q_d \cdot \frac{1}{2} l_{x,mid} \cdot \frac{1}{2} l_{y,mid})$$

Voor de kracht van de explosieven, F_{exlp}, is de gemiddelde drukkracht bij de impulskracht opgeteld. Daarbij is gebruikgemaakt van de volgende formules:

$$F_{expl} = F_{druk} + F_{impuls}$$

$$\text{met } F_{druk} = \frac{1}{2} \cdot P_{s0} \cdot A \qquad \text{en } F_{impuls} = \frac{m \cdot v}{t}$$

Voor de impulskracht is de tijd gelijk genomen aan de tijd van de positieve drukgolf van de explosie, t_0. Dit zou eigenlijk de duur van inslaan moeten zijn, maar aangezien deze heel lastig te bepalen is wordt er gerekend met t_0. Hierdoor is het mogelijk dat de kracht van de explosie eigenlijk net iets te laag uitvalt, waardoor de maximale dwarskracht ook lager uitvalt dan in de realiteit. Het zou dus kunnen dat sommige explosieven een grotere dwarskracht veroorzaken dan berekend.

Zoals eerder benoemd kan de vloer ook bezwijken als er pons ontstaat direct rond het inslaande explosief. Hierbij wordt alleen gekeken naar F_{exlp}. Onderstaand staat in tabel 17 een overzicht van het wel of niet bezwijken van de vloer op pons. Hier is te zien dat de vloer bezwijkt bij het inslaan van de kruisraket en de ballistische raket.

Tabel 17: Overzicht van maximaal optredende dwarskracht in de vloer. Indien het cijfer rood is gekleurd, betekent dit dat deze de maximaal toelaatbare dwarskracht heeft overschreden.

Locatie	**Kolom**		**Explosief**	
	$V_{Ed,kolom}$ (kN)	*V_{max} (kN)*	$V_{Ed,expl}$ (kN)	*V_{max} (kN)*
Artilleriegranaat	1035	*64813*	78	*60255.5*
Shahed-drone	2444	*64813*	4178.5	*65964*
Zweefbom	4408	*64813*	9891	*63427*
Kruisraket	76990	*64813*	221037.5	*64695*
Ballistische raket	121576	*64813*	348416	*64695*
Grote zweefbom	15297	*64813*	41567	*69769.5*

7. Discussie

De onderzoeksvraag die werd onderzocht in dit verslag was de volgende: Welke explosieven kan de Stevin II vloer weerstaan?

Hiervoor is eerst gekeken naar de draagkracht van de vloer en de kracht die de explosieven uitoefenen op de vloer. Vervolgens is er aan de hand van deze gegevens een massa-veersysteem gemodelleerd, waaruit bleek wat de reactie van de vloer op de explosieven was.

Uit het model bleek dat de artilleriegranaat, de Shahed-drone en de zweefbom voor een doorbuiging zouden zorgen die klein genoeg was voor de vloer om te kunnen weerstaan. De kruisraket, de ballistische raket en de grote zweefbom zullen er juist wel voor zorgen dat de vloer bezwijkt. Dit is getest voor zowel de zijkant van de vloer als het middenstuk. De zijkant bleek een kleinere draagkracht te hebben, maar de resultaten waren alsnog voor beide vloerdelen gelijk.

Niet alleen is er berekend of de vloer zou bezwijken op doorbuiging, ook is er gekeken naar bezwijken door pons. Hier is er rekening gehouden met bezwijken rondom de kolom en rondom het explosief dat inslaat. Het bleek dat zowel de kruisraket als de ballistische raket op beide plekken zou zorgen voor het bezwijken van de vloer op pons. De grote zweefbom bleek in dit geval niet voor bezwijking te zorgen. Er valt dus te concluderen dat het bezwijken op doorbuiging voor deze vloer maatgevend is.

De resultaten die zijn verkregen met dit onderzoek zijn niet exact accuraat. Dit komt onder andere omdat de gegevens van de projectielen een ruime schatting zijn in de juiste ordegrootte. Dit betekent dat er in grote lijnen wel kan worden gekeken of een bepaald projectiel wel of niet de vloer zal doen laten bezwijken, maar dat er eigenlijk niet precies kan worden gekeken naar de exacte eigenschappen van een projectiel die een grensgeval zou zijn.

Ook de berekeningen die zijn gedaan om tot de waardes voor de massa, stijfheid en veerstijfheid te komen zijn niet helemaal exact gedaan. Omdat een vloer in meerdere richtingen afdraagt is het lastig om exact te bepalen wat de grootte is van de krachten die worden afgedragen en hoe stijf de vloer daarbij is. In dit verslag zijn daarom versimpelingen en aannames gedaan door bijvoorbeeld het indelen van de vloer in stroken en het meenemen van de veiligheidsfactoren bij het berekenen van de statische belasting. Deze versimpelingen en aannames zorgen ervoor dat er niet exact kan worden gezegd bij welke doorbuiging de vloer zal bezwijken.

Bij het berekenen van de kracht van het explosief op de vloer zijn er ook verschillende aannames gedaan die zouden kunnen zorgen dat de resultaten afwijken van de werkelijkheid. De ontploffing is namelijk op een meter boven de grond aangenomen voor de berekening van de drukgolf, maar voor de berekening van de kracht door die drukgolf is er vervolgens vanuit gegaan dat het explosief is ingeslagen. Het zou kunnen zijn dat er eigenlijk een te kleine kracht is meegenomen, wat als effect zou hebben dat sommige projectielen de vloer eigenlijk wel zouden doen bezwijken die dat op huidig moment volgens het model wel doen.

In het geval van pons is de berekening in dit verslag ook niet een juiste weergave van de werkelijkheid. In dit verslag wordt de vloer versimpeld naar een stijve plaat om zo de dwarskracht op een eenvoudige manier te kunnen berekenen, maar in feite zorgt het trillen van de vloer ook voor een bijdrage in de weerstand tegen pons. In bijlage 5 is er ook even kort gekeken naar wat de dynamische invloeden zijn van de vloer op het wel of niet bezwijken van pons.

8. Conclusie

De conclusies die uit dit rapport kunnen worden getrokken zijn de volgende:

De projectielen die een hoge massa aan TNT hebben en een hoge snelheid hebben zijn de projectielen die de vloer zullen doen laten bezwijken. Als er wordt gekeken naar welke van deze twee eigenschappen maatgevend is bleek dat de snelheid te zijn. Bij een kleine verandering in de snelheid bleek uit het model veel verandering in de doorbuiging te ontstaan.

Ook is gebleken dat zodra de vloer plastische scharnieren had ontwikkeld en zich ging gedragen als een mechanisme, er maar een kleine aanpassing nodig was in de hoeveelheid TNT of de snelheid om de vloer te doen laten bezwijken.

Bij pons is er gekeken naar de plek waar de pons zou ontstaan, hier bleek het ontstaan van pons direct rondom het projectiel maatgevend, aangezien de dwarskracht hier hoger bleek te zijn. Verder is uit het rapport naar voren gekomen dat doorbuiging het maatgevende faalmechanisme is. Hierop zou de vloer bezwijken door drie van de zes projectielen, terwijl de vloer op pons maar door twee projectielen zou bezwijken.

Aan de hand van deze conclusies en resultaten zijn er verschillende vervolgonderzoeken mogelijk. Hieronder worden een paar voorbeelden gegeven.

In dit verslag is er echter gekozen om meer te focussen op de mechanica en dynamica dan op de details van verschillende explosieven, maar voor een vervolgonderzoek zou het interessant kunnen zijn om dieper te kijken naar wat de exacte eigenschappen zijn van verschillende projectielen en explosieven.

De plek van inslag is ook een factor die verder kan worden onderzocht. In dit verslag is er gekeken naar het inslaan op de vloer zelf, maar het bovenliggende dak zou ook kunnen bezwijken in het geval dat er een bom inslaat op het gebouw. Dit kan ook effect hebben op het bezwijken van de vloer. In een ander onderzoek is het ook mogelijk andere faalmechanismen mee te nemen naast doorbuiging en pons, zoals verbrijzeling.

Voor pons zou er in een vervolgonderzoek beter kunnen worden gekeken naar de dynamische invloeden van de vloer op het bezwijken op pons. In dit rapport is de vloer bekeken als een stijve plaat als het ging om pons, maar in werkelijkheid zorgt het trillen van de vloer voor een veerkracht in de vloer die ook meegenomen zou moeten worden, waardoor buiging en pons geen losstaande faalmechanismes zijn. In een vervolgonderzoek zou het interessant zijn te kijken naar hoe de faalmechanismes van pons en buiging zich tot elkaar verhouden.

Als laatste zou het interessant zijn om te kijken hoe de krachten in een vloer zich precies afdragen naar de opleggingen toe. In dit verslag is de afdracht versimpeld tot een lineair probleem, maar in werkelijkheid ligt dit wat ingewikkelder. Er zou dus kunnen worden gekeken hoe de krachten zich verdelen over de vloer en wat voor effect dat heeft op de stijfheid en sterkte van de vloer.

Referentielijst

Angelides, S. C., Morison, C., Burgan, B. A., Kyprianou, C., Rigby, S. E., & Tyas, A. (2023). A methodology for predicting far-field blast loading on structures. *Structures*, *58*. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105619

Army Recognition Group. (2025, 12 maart). *Shahed-136*. Geraadpleegd op 12 mei 2025, van https://armyrecognition.com/military-products/army/unmanned-systems/unmanned-aerial-vehicles/shahed-136-loitering-munition-kamikaze-suicide-drone-technical-data

Blaauwendraad, J. (2016). *Dynamica van Systemen: Collegedictaat*. Technische Universiteit Delft.

Braam, CR., & Lagendijk, P. (2011). *Constructieleer gewapend beton*. Cement & Beton Centrum.

Cao, L., Qi, H., & Li, J. (2018). Experimental and numerical studies on the vibration serviceability of fanshaped prestressed concrete floor. *International Journal Of Distributed Sensor Networks*, *14*(8). https://doi.org/10.1177/1550147718795746

GICHD. (2025). *Explosive Ordinance Guide for Ukrain: Third Edition*. Geneva International Centre for Humanitarian Demining. Geraadpleegd op 4 mei 2025, van https://www.gichd.org/fileadmin/user_upload/Explosive_Ordnance_Guide_for_Ukraine__GICHD_-_Third_edition__v06_WEB.pdf

Hoving, D. (z.d.). *Hét beest van de TU Delft klaar voor actie*. TU Delft. Geraadpleegd op 14 mei 2025, van https://www.tudelft.nl/me/onderzoek/check-out-our-science/het-beest-van-de-tu-delft-klaar-voor-actie#:~:text=Daar%20moet%20's%20werelds%20meest,het%20beest%20van%20TU%20Delft.

Lutzenberger, B. J. (2000). *Numerical analysis of blast loaded civilian structures*. Geraadpleegd op 23 mei 2025, van https://studylib.net/doc/13536113/numerical-analysis-of-blast-loaded-civilian-structures-by. . .?

Missile Defence Project. (2024, 23 april). *OTR-21 Tochka (SS-21)*. Missile Threat. Geraadpleegd op 12 mei 2025, van https://missilethreat.csis.org/missile/ss-21/

Nederlandse Vereniging van Journalisten. (z.d.). *Sterkteklasse*. joostdevree.nl. Geraadpleegd op 4 mei 2025, van https://www.joostdevree.nl/shtmls/sterkteklasse.shtml

Tai, Y. S., Chu, T. L., Hu, H. T., & Wu, J. Y. (2011). Dynamic response of a reinforced concrete slab subjected to air blast load. *Theoretical And Applied Fracture Mechanics*, *56*(3), 140–147. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167844211000942

The essential guide to punching shear | Diales. (2024, 24 oktober). Diales. Geraadpleegd op 16 juni 2025, van https://www.diales.com/en/news/the-essential-guide-to-punching-shear

Technische Universiteit Delft. (z.d.). *CIE3150 Ch. 15 – Crack Width Control*. Geraadpleegd op 10 juni 2025, van https://brightspace.tudelft.nl/d2l/le/content/680901/viewContent/3900142/View

TU Delft. (z.d.). *Hexapod*. Geraadpleegd op 16 mei 2025, van https://www.tudelft.nl/me/over/afdelingen/maritime-and-transport-technology/research/ship-and-offshore-structures/facilities/hexapod

Uddin, N. (2010). *Blast Protection of Civil Infrastructures and Vehicles Using Composites*. Woodhead Publishing. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781845693992500147

Uniebouw Webshops B.V. [Bouwbestel]. (z.d.). *Soortelijk gewicht beton (opgedroogd)*. bouwbestel.nl. Geraadpleegd op 14 mei 2025, van https://www.bouwbestel.nl/blog/soortelijk-gewicht-beton-droog-per-m3.html

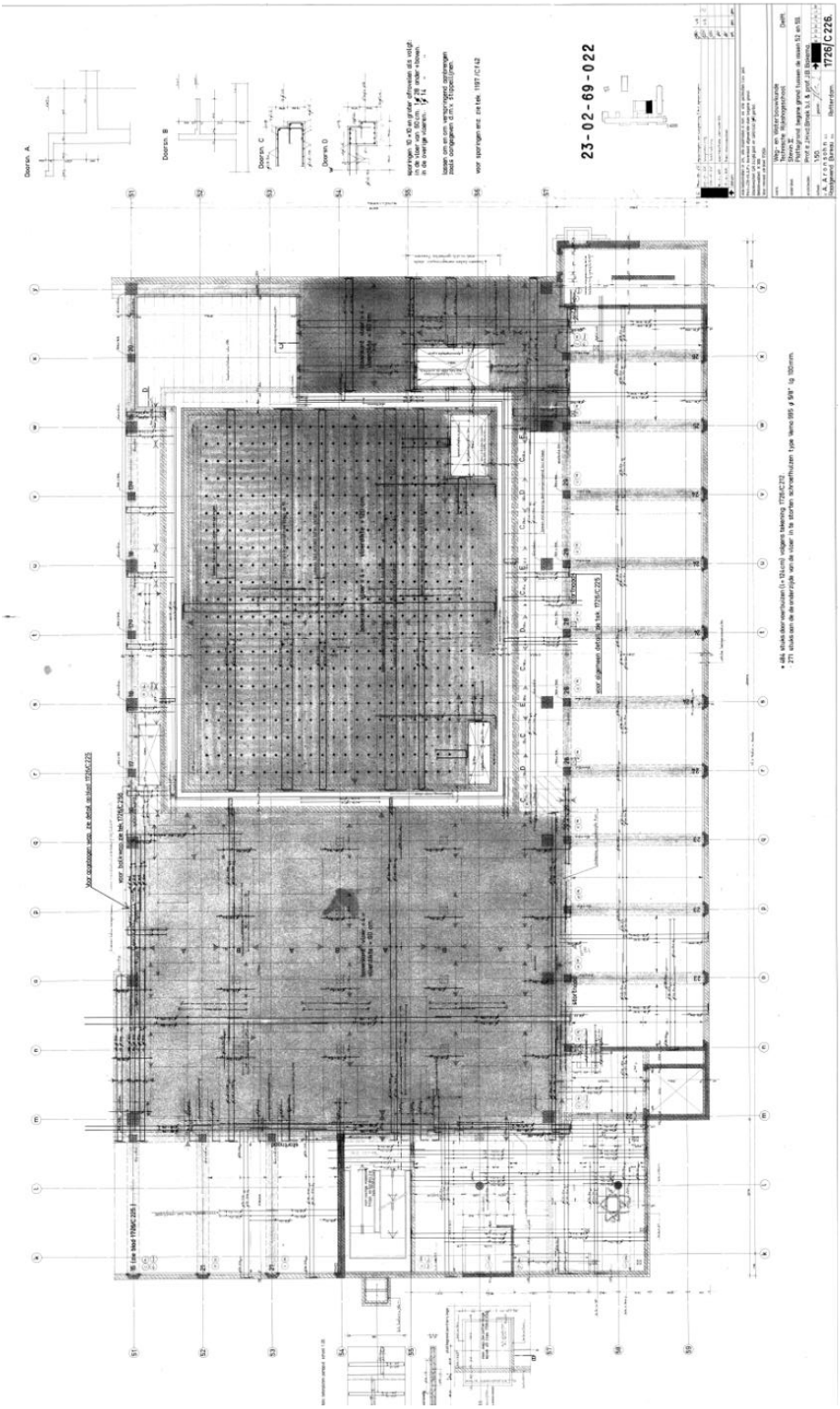
Van Wijngaarden, A. (2017, 8 maart). *Betonstaal coderingen vanaf 1950*. betonstaal.nl. Geraadpleegd op 4 mei 2025, van https://www.betonstaal.nl/kenniscentrum/betonstaal-coderingen-vanaf-1950/

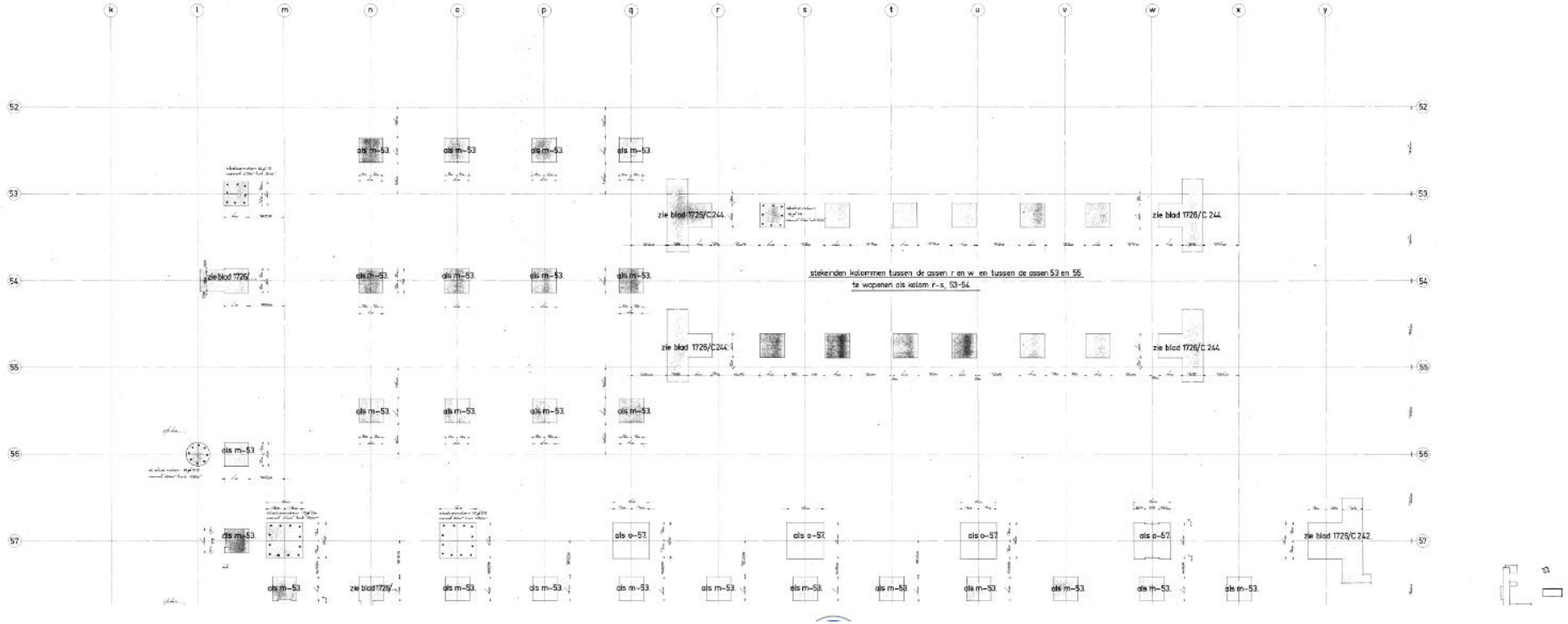
Vasileios, K., & George, S. (2013). Calculation of Blast Loads for Application to Structural Components. *JRC Publications Repository*, *JRC87200*. https://doi.org/10.2788/61866

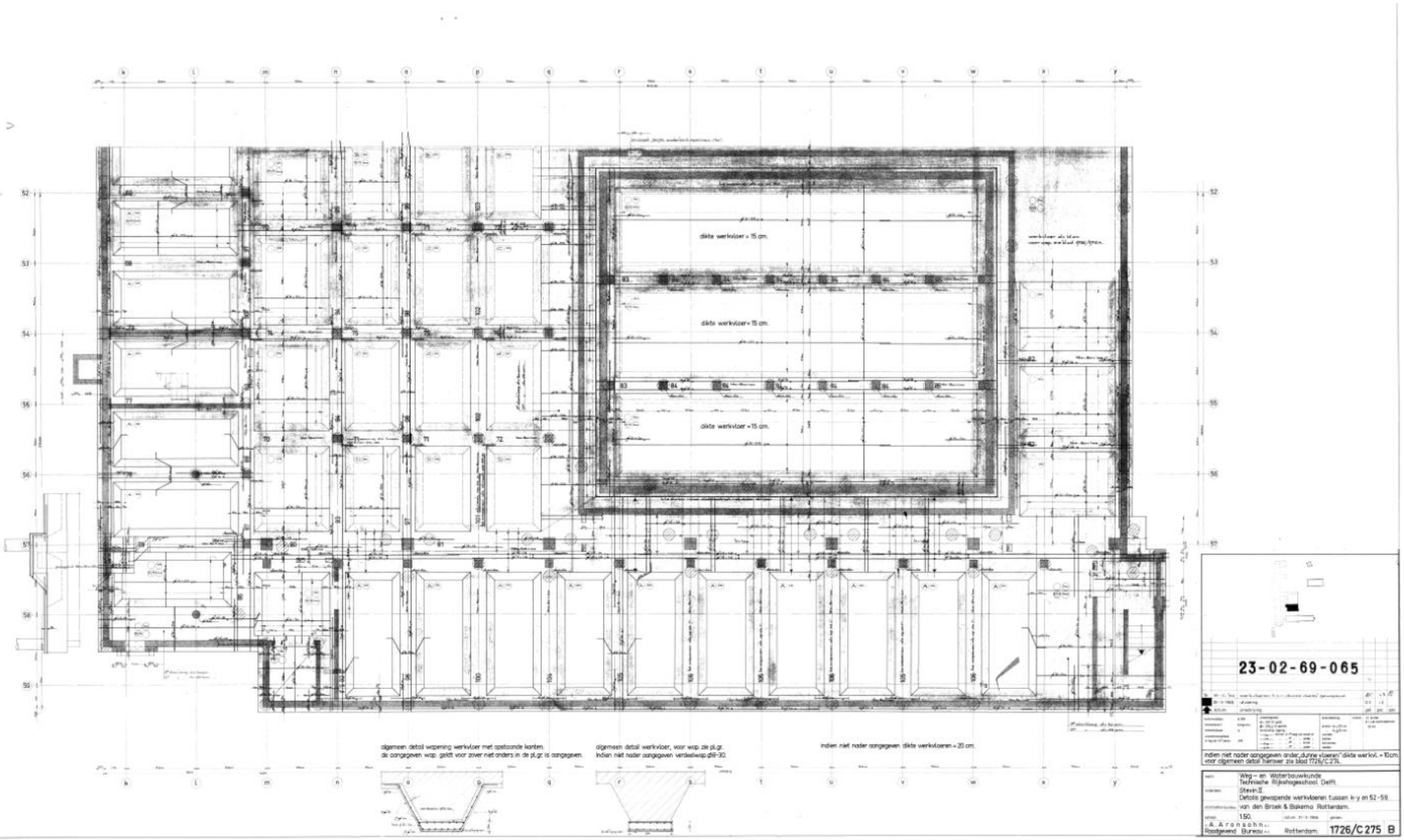
Zhou, Y., Zhang, Y., Ma, H., & Chen, H. (2019). *400 MPa stage reinforcing steel bar and manufacturing method thereof*.

Bijlage 1: Bouwtekeningen

Hieronder zijn de bouwtekeningen van respectievelijk de vloer van de begane grond, de kolommen van de kelder en de details van de vloer van de kelder te vinden tussen de assen 52 en 58.




k
l
m
n
o
p
q
r
s
t
u
v
w
x
y
52
53
54
55
56
57
als m-53.
zie blad 1725/C 244.
zie blad 1726/C 244.
stekenden kolommen tussen de assen r en w en tussen de assen 53 en 55
te wapenen als kolom r-s, 53-54.
zie blad 1725/C 244.1
als o-57.
zie blad 1725/C 242.


dikte werkvloer = 15 cm.
dikte werkvloer = 15 cm.
dikte werkvloer = 15 cm.
algemeen detail wapening werkvloer met opstaande kanten.
de aangegeven wap. geldt voor zover niet anders in de pl.gr. is aangegeven.
algemeen detail werkvloer, voor wap. zie pl.gr.
Indien niet nader aangegeven verdeelwap.ø8-30.
indien niet nader aangegeven dikte werkvloeren = 20 cm.
23-02-69-065
indien niet nader aangegeven ander,dunne vloeren" dikte werkvl. = 10cm.
voor algemeen detail hiervoor zie blad 1726/C 274.
Weg- en Waterbouwkunde
Technische Rijkshogeschool Delft.
Stevin II
Details gewapende werkvloeren tussen k-y en 52-59.
van den Broek & Bakema Rotterdam.
1:50.
A. Aronsohn
Raadgevend Bureau
Rotterdam.
1726/C 275 B

Bijlage 2: Uitwerkingen

Hieronder zijn de uitwerkingen van verschillende berekeningen uit het verslag te vinden.

1. Voorbeeldberekening stijfheid EI van de kolomstrook

$$x_u = \frac{3540 \cdot \frac{400}{1.15}}{0.75 \cdot 1000 \cdot \frac{19}{1.5}} = 129.6\ mm$$

$$M_{Pl} = 3540 \cdot \frac{400}{1.15} \cdot (1135 - 0.389 \cdot 129.6) = 1335.3\ kNm/m$$

$$\varepsilon_s = \frac{1135 - 129.6}{129.6} \cdot 0.00175 = 0.013576\ [-]$$

$$\kappa = \frac{0.00175 + 0.013576}{1135} = 0.14 \cdot 10^{-4}\ 1/mm$$

$$EI = \frac{1335.3}{0.14 \cdot 10^{-4}} = 5.12 \cdot 10^4\ kNm^2/m$$

2. Voorbeeldberekening plastische doorbuigingsgrens van middenstuk

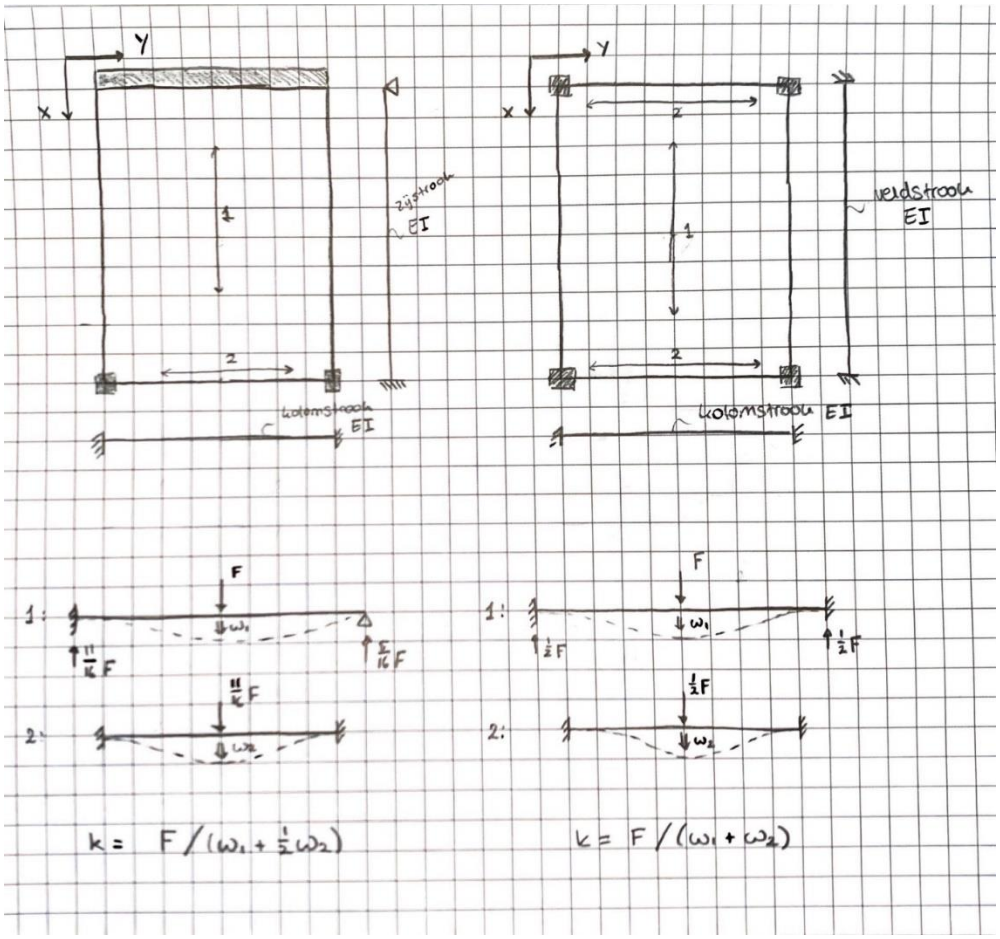
Hieronder is een voorbeeld gegeven voor de berekening van doorbuiging voordat de vloer zal veranderen in een mechanisme.

$$q_1 = \frac{12 \cdot 1335.3 \cdot 1.35}{5.4^2} = 1560\ kN/m$$

$$q_2 = \frac{4 \cdot 966.0 \cdot 2.7}{5.4^2} = 564\ kN/m$$

$$w_{pl,mid} = \frac{1}{384} \cdot \frac{1560 \cdot 5.4^4}{5.12 \cdot 10^4 \cdot 1.35} + \frac{5}{384} \cdot \frac{564 \cdot 5.4^4}{5.12 \cdot 10^4 \cdot 2.7} = 0.0771\ m$$

3. Schematisering van berekening veerstijfheid k



Als er een kracht in het midden van het zijstuk van de vloer wordt gezet zullen er twee componenten meespelen in de doorbuiging van het midden, namelijk de doorbuiging van de vloer in x-richting, en de helft van de doorbuiging van de kolomstrook die in y-richting zal doorbuigen.

Voor de doorbuiging in het midden van het middenstuk van de vloer wordt ook de doorbuiging in x-richting meegenomen, maar omdat de vloer twee kolomstroken heeft bij dit deel van de vloer wordt voor de doorbuiging in het midden de volledige doorbuiging in y-richting meegenomen.

4. Voorbeeld van de berekening voor de maximale dwarskracht bij pons rondom de artilleriegranaat

$$u_1 = \pi \cdot (150 + 4 \cdot 1150) = 14922.5\ mm$$

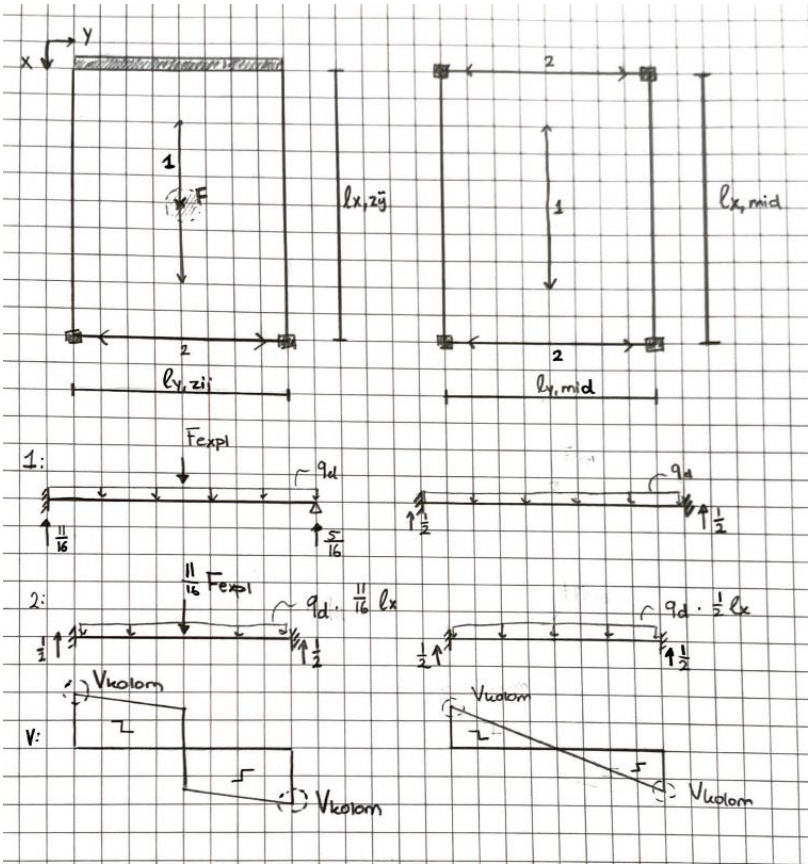
Vervolgens is de maximale dwarskracht te berekenen:

$$v_{Rd,max} = 0.5 \cdot 0.6\left(1 - \frac{19}{250}\right) \cdot \frac{19}{1{,}5} = 3.51\ MPa$$

$$V_{max} = 3.51 \cdot 14922.5 \cdot 1150 = 60255.5\ kN$$

5. Schematisch overzicht van bepaling dwarskracht in de kolommen van beide vloerdelen

Om te bepalen wat de maximale dwarskracht is in de kolommen zijn de volgende mechanicaschema's gebruikt:



$$F_{druk} = \frac{1}{2} \cdot 5182.3 \cdot 0.0177 = 45.79\ kN$$

$$F_{impuls} = 0.001 \cdot \frac{20 \cdot 3.5}{0.002154} = 32.49\ kN$$

$$F_{expl} = 45.79 + 32.49 = 78.28\ kN$$

$$V_{Ed} = \frac{1}{2} \cdot \frac{11}{16} \cdot 78.28 + 2 \cdot (66 \cdot \frac{11}{16} \cdot 4.3 \cdot \frac{1}{2} \cdot 2.7) + 2 \cdot (66 \cdot \frac{1}{2} \cdot 5.4 \cdot \frac{1}{2} \cdot 2.7) = 1034.9\ kN$$

Bijlage 3: Python-model

Berekeningen voor doorbuiging, pons en explosieven

In [1]:
```
%matplotlib inline
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd
```

Berekening buiging (Mpl en EI)

In [2]:
```
#Parameters invullen
alpha = 0.75
beta = 0.389
fyk = 400 #Mpa
fyd = fyk/1.15
fck = 19 #Mpa
fcd = fck/1.5
h = 1200 #mm
eps_c = 0.00175
```

In [3]:
```
data = {'diam': [22, 26, 22], 's':[150, 150, 150], 'b':[3625, 675, 4050]}
indices = ['zijstrook', 'kolomstrook', 'veldstrook']
tabel = pd.DataFrame(data, indices)
```

In [4]:
```
tabel['c'] = [57, 52, 57] + tabel.diam*0.5
tabel['As'] = 1000 / tabel.s * tabel.diam**2 * np.pi * 0.25
tabel['d'] = h - tabel.c
tabel['xu'] = (tabel.As * fyd) / (alpha * 1000 * fcd)
tabel['Mpl'] = tabel.As * fyd * (tabel.d - tabel.xu * beta)
tabel['eps_s'] = ((tabel.d - tabel.xu) / tabel.xu) * eps_c
tabel['Kromming'] = (tabel.eps_s + eps_c) / tabel.d
tabel['EI'] = (tabel.Mpl * 10**-6) / (tabel.Kromming * 10**3)
```

Berekening maximale doorbuiging

In [5]:
```
data_w = {'l': [4.3, 5.4]}
indices_w = ['zijkant', 'middenstuk']
tabel_w = pd.DataFrame(data_w, indices_w)
tabel_w['q1_hulp'] = [8 * tabel.loc['kolomstrook', 'Mpl']*10**-6 * 2.7, 12 *  tabel
tabel_w['q1'] = tabel_w.q1_hulp / (tabel_w.l**2)
tabel_w['q2_hulp'] = [4 * tabel.loc['zijstrook', 'Mpl']*10**-6 * 2.7, 4 * tabel.loc
tabel_w['q2'] = tabel_w.q2_hulp / (tabel_w.l**2)

#berekening wmax zijkant
w_max_zij = (1/192 * tabel_w.loc['zijkant', 'q1'] * tabel_w.loc['zijkant', 'l']**4/
             + 5/384 * tabel_w.loc['zijkant', 'q2'] * tabel_w.loc['zijkant', 'l']**

#berekening wmax middenstuk
w_max_mid = (1/384 * tabel_w.loc['middenstuk', 'q1'] * tabel_w.loc['middenstuk', 'l
             + 5/384 * tabel_w.loc['middenstuk', 'q2'] * tabel_w.loc['middenstuk',
```

Berekening veerstijfheid k

In [6]:
```
#voor de berekeningen van de veerstijfheid k
data2 = {'Lengte': [4.3, 2.7, 5.4], 'Breedte': [2.7, 1.35, 2.7]}
indices2 = ['zijstrook', 'kolomstrook', 'veldstrook']
tabel2 = pd.DataFrame(data2, indices2)
tabel2['EI'] = tabel.EI * tabel2.Breedte
```

In [7]:
```
k_zijstrook = 768 * tabel2.loc['zijstrook', 'EI'] / (7 * tabel2.loc['zijstrook', 'L
k_kolomstrook = 192 * tabel2.loc['kolomstrook', 'EI'] / tabel2.loc['kolomstrook', '
k_veldstrook = 192 * tabel2.loc['veldstrook', 'EI'] / tabel2.loc['veldstrook', 'Len

k_zijkant = 1 / (1/k_zijstrook + (11/16) / (2 * k_kolomstrook))
k_middenstuk = 1 / (1/k_veldstrook + 0.5 / k_kolomstrook)
```

Pons explosieven

In [8]:
```
data3 = {'diam': [150, 600, 400, 500, 500, 900]}
indices3 = ['Artillerie granaat', 'Shahed drone', 'Zweefbom', 'Kruisraket','Ballist
pons = pd.DataFrame(data3, indices3)
```

In [9]:
```
deff = 1150
vrdmax = 0.5 * 0.6 * (1 - fck/250) * fcd
pons['u1'] = np.pi * (pons.diam + 4 * deff)
pons['Vmax'] = vrdmax * deff * pons.u1 * 10**-3
```

Druk en impuls berekening

In [10]:
```
R = 1 # m
t0 = 0.001 # s

data4 = {'W_TNT': [10, 50, 200, 100, 400, 2200]}
indices4 = ['Artillerie granaat', 'Shahed drone', 'Zweefbom', 'Kruisraket','Ballist
tabel_expl = pd.DataFrame(data4, indices4)
```

In [11]:
```
tabel_expl['Z'] = R / tabel_expl.W_TNT**(1/3)
tabel_expl['P_s0'] = (20.06 * tabel_expl.Z**-1 + 1.94 * tabel_expl.Z**-2 - 0.04 * t
tabel_expl['t0'] = 0.001 * tabel_expl.W_TNT**(1/3)
```

In [12]:
```
tabel_expl['m'] = [20, 200, 500, 1200, 2500, 3000]
tabel_expl['d'] = pons.diam/1000
tabel_expl['v_kmh'] = [12.6, 185, 370, 3060, 3672, 400]
tabel_expl['v_ms'] = tabel_expl.v_kmh / 3.6
```

Pons bezwijken kolom

In [13]:
```
A = tabel_expl.d**2 * np.pi * 0.25
F_druk = 0.5 * tabel_expl.P_s0 * A
F_impuls = 0.001 * tabel_expl.m * tabel_expl.v_ms / tabel_expl.t0
F = F_druk + F_impuls
```

In [14]:
```
q = 66
lx_zij = 4.3
ly_zij = 2.7
lx_mid = 5.4
ly_mid = 2.7

V_zij = 0.5 * 11/16 * F + 2 * (q * 11/16 * lx_zij * 1/2 * ly_zij)
```

```
V_mid = 2 * (q * 1/2 * lx_mid * 1/2 * ly_mid)

V = V_zij + V_mid
```

In [ ]:
```

```

Code voor model

In [1]:
```
%matplotlib inline
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd
```

In [2]:
```
%run Buiging_berek.ipynb
```

In [3]:
```
#Voorwaartse Euler methode
def for_Euler(t, t_druk, P, A, c, k, m_bom, m_vloer, v_bom, u, w_pl, w_max):
    t_list = [] #lijst voor tijdstappen
    u_list = [] #lijst voor zakkingen vloer voor grafiek
    v = v_bom * m_bom / (m_bom + m_vloer)

    while t < 1:

        if t < t_druk:
            F = P * (1 - t/t_druk) * A
        else:
            F = 0
        a_n = (F - c*v - k*u) / (m_bom + m_vloer)
        v_n = v + dt * a_n
        u_n = u + dt * v_n

        v = v_n
        u = u_n

        t_list.append(t)
        u_list.append(u)

        t += dt

        if u > w_pl:
            k = 0

    return t_list, u_list
```

Berekeningen voor de zijkant van de vloer

In [4]:
```
#massa
m_vloer = 7.6626 #ton (1000 kg)
m_bom = tabel_expl.m / 1000 #ton (1000 kg)

#demping en veerconstante
k = k_zijkant #kN / m
c = 2 * 0.05 * np.sqrt(k * (m_bom + m_vloer)) #kNs / m

#snelheid en doorzakking
v_bom = tabel_expl.v_ms # snelheid in m/s
u = 0 # begindoorzakking in m
w = w_max_zij #maximale doorzakking in m
w_max = 0.254

#begintijd, tijdstap en tijdsduur van positieve drukgolf
dt = 0.00001 # tijdstap in s
t = 0 # tijd in s
t_druk = tabel_expl.t0 # lengte van de impuls in s

#druk en oppervlakte (voor berekening kracht door drukgolf)
P = tabel_expl.P_s0
A = tabel_expl.d**2 * np.pi * 0.25
```

In [5]:
```
#plotten van de grafieken
fig, axs = plt.subplots(3, 2, figsize=(12, 15))

axs = axs.flatten()

for i in range(len(F)):
    t_list, u_list = for_Euler(t, t_druk[i], P[i], A[i], c[i], k, m_bom[i], m_vloer

    axs[i].plot(t_list, u_list)
    axs[i].plot(t_list, np.ones(len(t_list))*w, color='r', ls='--')
    axs[i].plot(t_list, np.ones(len(t_list))*w_max, color='r')
    axs[i].set_title(f'Zakking door {tabel_expl.index[i]} aan de zijkant', fontsize
    axs[i].set_xlabel('t [s]')
    axs[i].set_ylabel('u [m]')
fig.subplots_adjust(wspace=0.4, hspace=0.6)
```

Berekening voor het middenstuk van de vloer

In [6]:
```
#massa
m_vloer = 9.6228 #ton (1000 kg)
m_bom = tabel_expl.m / 1000 #ton (1000 kg)

#demping en veerconstante
k = k_middenstuk #kN / m
c = 2 * 0.05 * np.sqrt(k * (m_bom + m_vloer)) #kNs / m

#snelheid en doorzakking
v_bom = tabel_expl.v_ms # snelheid in m/s
u = 0 # doorzakking in m
w = w_max_mid #maximale doorzakking in m
w_max = 0.320

#begintijd, tijdstap en tijdsduur van positieve drukgolf
```

```
dt = 0.00001 # tijdstap in s
t = 0 # tijd in s
t_druk = tabel_expl.t0 # lengte van de impuls in s

#druk en oppervlakte (voor berekening kracht door drukgolf)
P = tabel_expl.P_s0
A = tabel_expl.d**2 * np.pi * 0.25
```

In [7]:
```
#plotten van de grafieken
fig, axs = plt.subplots(3, 2, figsize=(12, 15))

axs = axs.flatten()

for i in range(len(F)):
    t_list, u_list = for_Euler(t, t_druk[i], P[i], A[i], c[i], k, m_bom[i], m_vloer

    axs[i].plot(t_list, u_list)
    axs[i].plot(t_list, np.ones(len(t_list))*w, color='r', ls='--')
    axs[i].plot(t_list, np.ones(len(t_list))*w_max, color='r')
    axs[i].set_title(f'Zakking door {tabel_expl.index[i]} op het middenstuk', fonts
    axs[i].set_xlabel('t [s]')
    axs[i].set_ylabel('u [m]')
fig.subplots_adjust(wspace=0.4, hspace=0.6)
```

Bepalen explosief zodat de vloer net niet bezwijkt

Bij zijkant bepaald, stuk vloer is maatgevender. De zweefbom wordt als basis gebruikt omdat deze het dichtst bij bezwijken ligt. Alleen de snelheid, dempingsratio en de hoeveelheid TNT worden aangepast, de andere dimensies blijven hetzelfde. In deze code zijn elke keer de waardes verandert om een nieuwe grafiek te kunnen plotten.

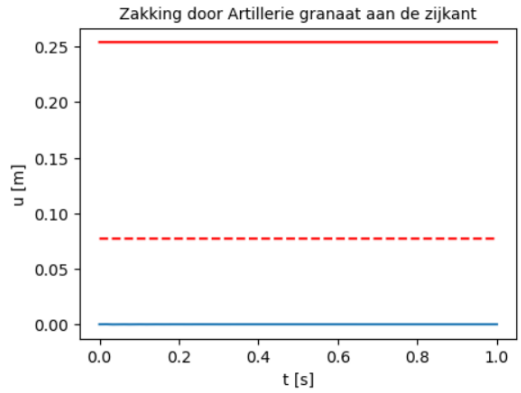
In [8]:
```
#massa
m_vloer = 7.6626 #ton (1000 kg)
m_bom = 500 / 1000 #ton (1000 kg)

#demping en veerconstante
k = k_zijkant #kN / m
dr = 0.05
c = 2 * dr * np.sqrt(k * (m_bom + m_vloer)) #kNs / m
```

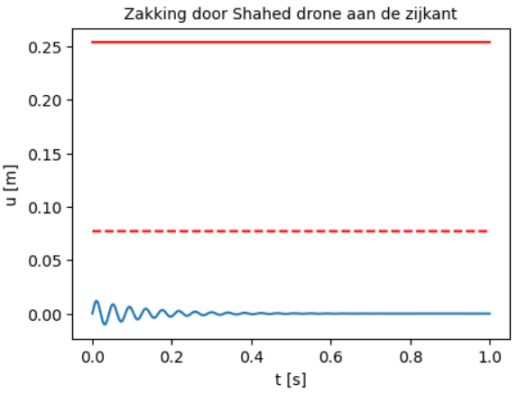
```
#snelheid en doorzakking
v_bom = 102 # snelheid in m/s
u = 0 # begindoorzakking in m
w = w_max_zij #maximale doorzakking in m
w_max = 0.254

#begintijd, tijdstap en tijdsduur van positieve drukgolf
dt = 0.00001 # tijdstap in s
t = 0 # tijd in s

#druk en oppervlakte (voor berekening kracht door drukgolf)
W_TNT = 200
Z = R / W_TNT**(1/3)
P = (20.06 * Z**-1 + 1.94 * Z**-2 - 0.04 * Z**-3) * 100
A = 0.4**2 * np.pi * 0.25
t_druk = 0.001 * W_TNT**(1/3) # lengte van de impuls in s
```

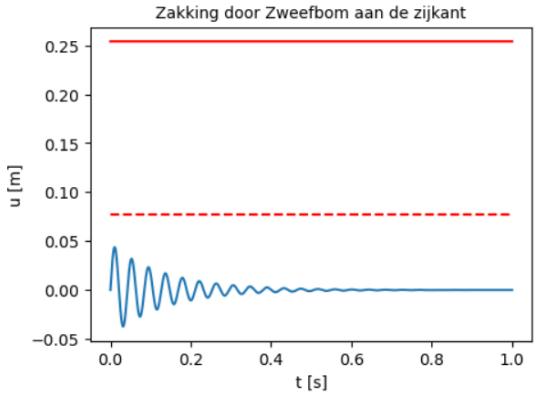
In [9]:
```
#plotten van de grafiek
t_list, u_list = for_Euler(t, t_druk, P, A, c, k, m_bom, m_vloer, v_bom, u, w, w_ma

plt.plot(t_list, u_list)
plt.plot(t_list, np.ones(len(t_list))*w, color='r', ls='--')
plt.plot(t_list, np.ones(len(t_list))*w_max, color='r', ls='--')
plt.title(f'Zakking door zweefbom op de zijkant met dempingsratio {dr}')
plt.xlabel('t [s]')
plt.ylabel('u [m]');
```

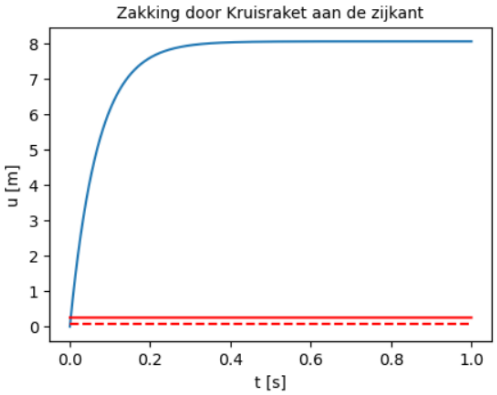
Bijlage 4: Grafieken van doorbuigingen door alle explosieven.

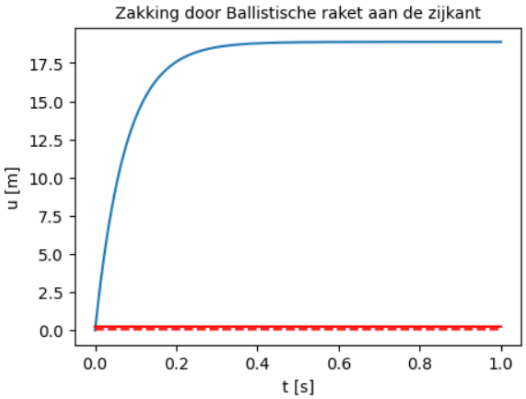
Zakking van de zijkant van de vloer per explosief:

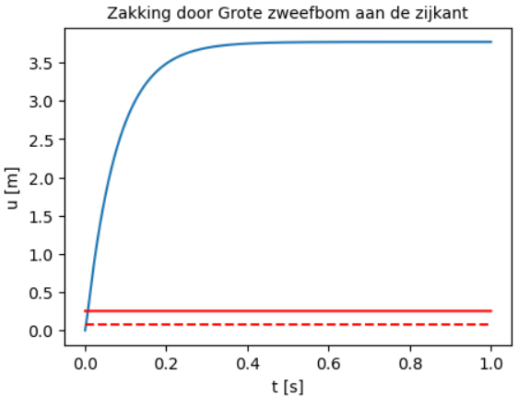




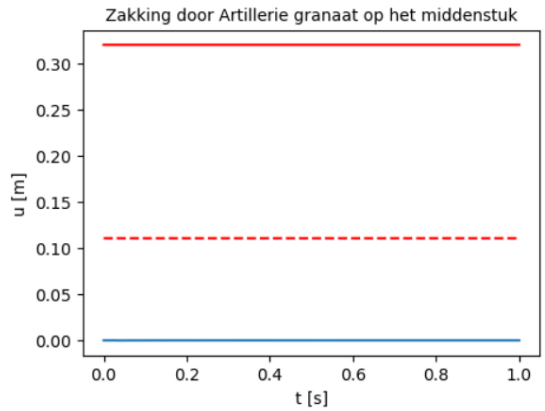


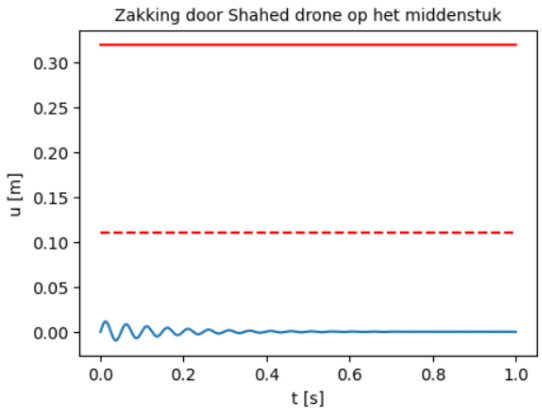


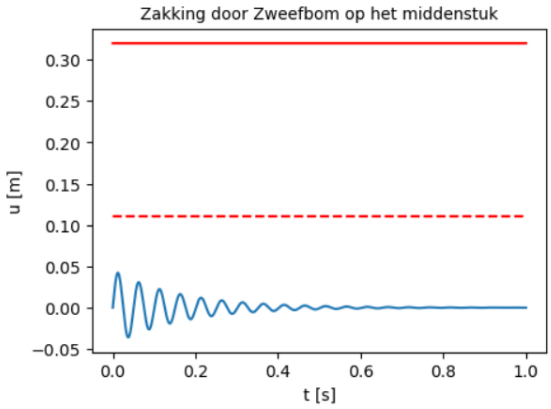


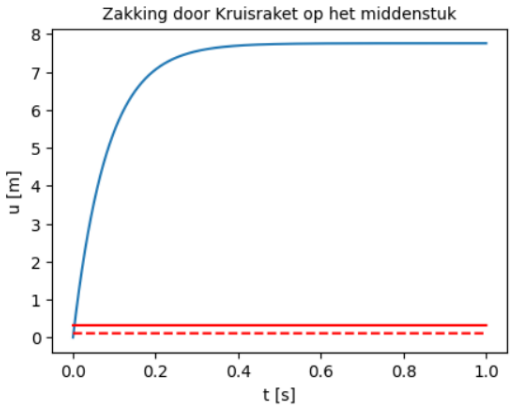


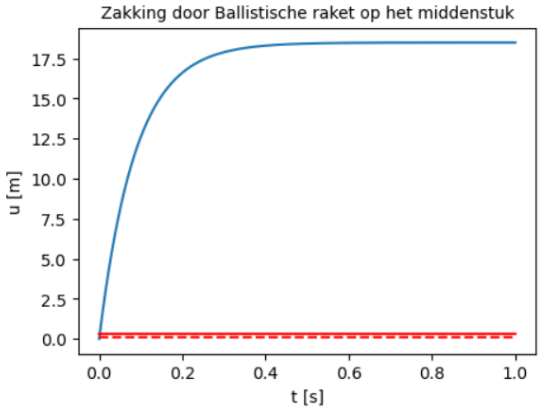
Zakking van het middenstuk van de vloer per explosief:

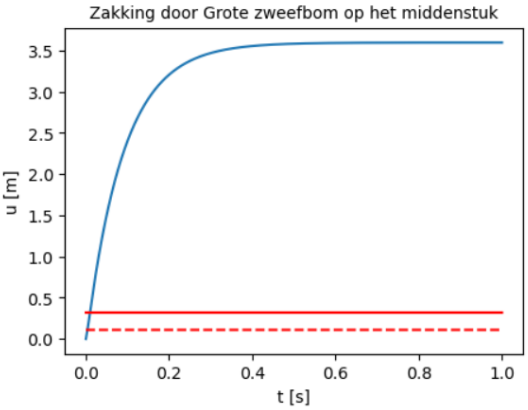












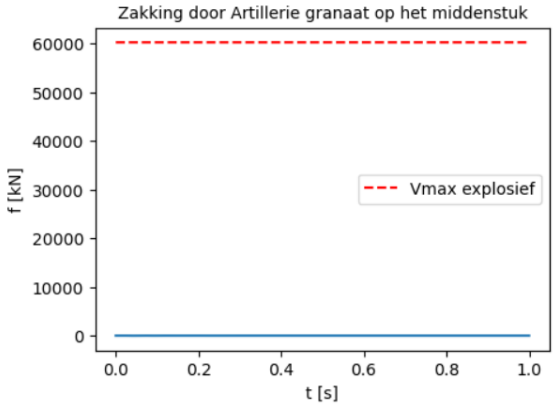
Bijlage 5: Dynamisch model voor bepalen bezwijken op pons

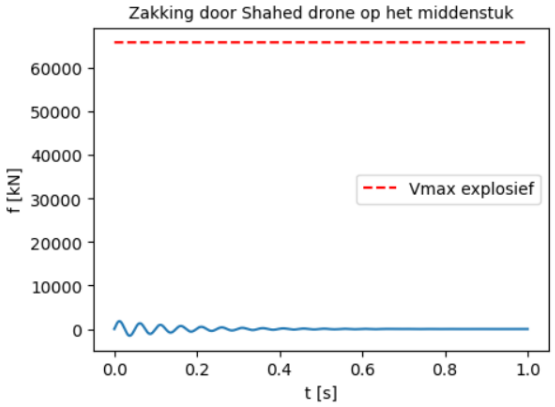
In het verslag is er gekeken naar pons door de vloer te zien als een stijve plaat, waardoor de dwarskracht direct rondom de projectielen gelijk is genomen aan de kracht van inslag van het projectiel. Er kan echter ook gekeken worden naar het bezwijken van de vloer op pons direct rondom het projectiel terwijl er rekening wordt gehouden met de dynamische beweging van de vloer die op zal treden bij inslag. In dit geval staat het bezwijken op pons niet los van het bezwijken op doorbuiging, maar is het een gezamenlijk proces. In deze bijlage wordt kort besproken wat de effecten van deze andere benadering zouden zijn voor het falen op pons.

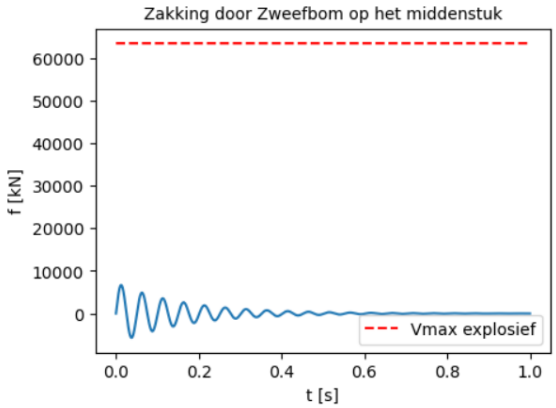
Bij pons wordt er gekeken naar de dwarskracht rondom een kolom of, in het geval van dit verslag, rondom een explosief. De dwarskracht die moet mee worden genomen als er rekening moet worden gehouden met de dynamische beweging van de vloer is gelijk aan de veerkracht die door de vloer wordt gegeven. De veerkracht is met de volgende formule te bepalen:

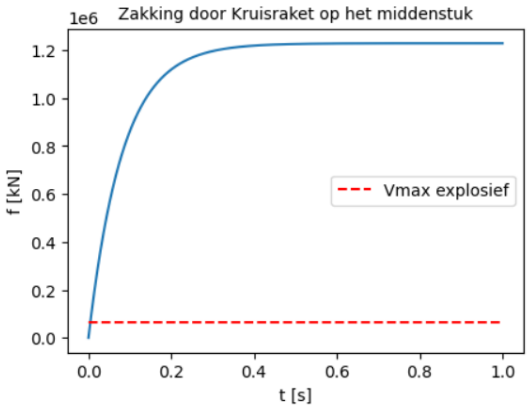
$$F = k \cdot u$$

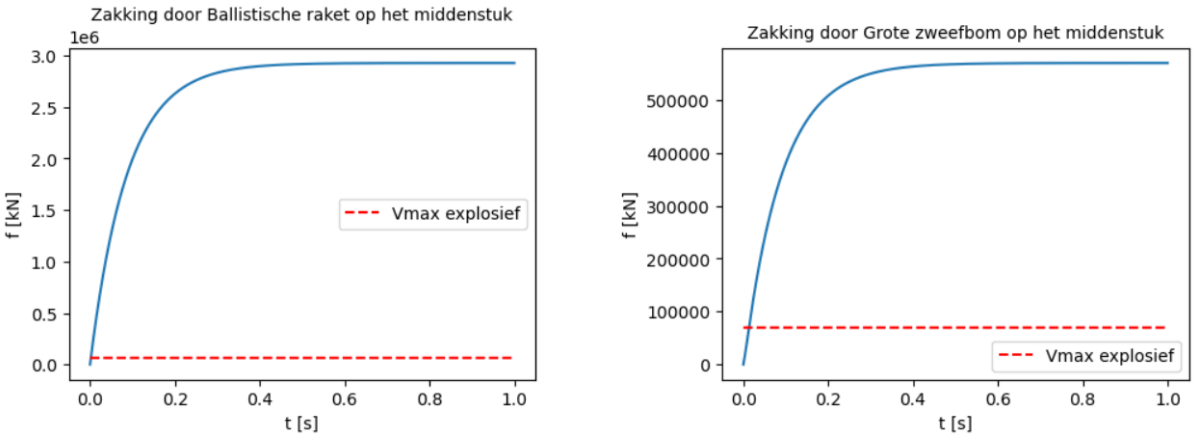
Hierbij is u de dynamische doorbuiging van de vloer en k de veerstijfheid van de vloer, beide bepaald aan de hand van het massa-veersysteem uit hoofdstuk 5. Hierdoor krijgt de kracht ook een dynamisch verloop. Dit verloop is te zien in onderstaande grafieken voor het middenstuk van de vloer, aangezien deze maatgevend bleek te zijn.











Figuur 18: Grafieken van veerkracht in het middenstuk van de vloer. Als deze kracht boven 'Vmax explosief' is gekomen is de vloer bezweken op pons.

In deze grafieken is te zien dat de explosieven die op buiging waren bezweken ook op pons zullen bezwijken. Ook is te zien dat de kracht van de explosieven die zijn bezweken constant blijven na een bepaalde tijd. Dit heeft te maken met de plastische vervorming die plaatsvind na een bepaalde tijd.

In een ander onderzoek zou verder onderzocht kunnen worden wat voor een rol de veerkracht precies speelt bij het bezwijken van de vloer op pons en welk faalmechanisme eerder zou optreden, pons of maximale doorbuiging.