Kan de kelder van het Civiele Techniek gebouw dienen als schuilkelder?

Onderzoek naar de impact van een explosie op het kelderplafond

door
Ruben Rietveld
5637023

Onder begeleiding van:
Dr. Ir. P.C.J. Hoogenboom
Prof. Dr. H.M. Jonkers

Faculteit Civiele Techniek
Technische Universiteit Delft
September, 2024

Voorwoord

Dit rapport vormt het eindwerk van mijn Bachelor Civiele Techniek aan de Technische Universiteit Delft.

In dit onderzoek heb ik onderzocht of de kelder van het Civiele Techniek gebouw in staat is te dienen als schuilkelder in tijden van explosieve dreiging. Het onderwerp van dit onderzoek is gekozen vanwege de toenemende belangstelling voor de veiligheid van ondergrondse structuren en de noodzaak om bestaande infrastructuur te beoordelen op geschiktheid in noodsituaties.

Dit rapport is bedoeld voor lezers met basiskennis over wiskunde, natuurkunde en met interesse voor constructie mechanica en veiligheidsmaatregelen.

Ik wil graag mijn begeleider Dr. Ir. P.C.J. Hoogenboom bedanken voor de ondersteuning en waardevolle feedback tijdens mijn proces.

Rietveld Ruben

Delft, Oktober 2024

Samenvatting

Dit onderzoek richt zich op de mogelijke impact van een explosie op het kelderplafond van het Civiele Techniek gebouw aan de TU Delft. Het doel was om te bepalen of de kelder in staat is te kunnen dienen als schuilkelder in het geval van een noodsituatie, waarbij de kelderconstructie bestand moet zijn tegen potentiële explosieve belastingen. De belangrijkste vraag was of het kelderplafond zou bezwijken onder de impact van een realistische explosie.

Om deze vraag te beantwoorden, werd een gedetailleerde analyse uitgevoerd van de kelderstructuur, de materialen, en de bovenliggende lagen zoals de zandlaag en de rijweg. Daarnaast zijn verschillende explosieven, waaronder mortieren en artilleriegranaten, onderzocht om hun explosieve kracht en bijbehorende drukgolven te bepalen. Via berekeningen is de kratervorming, grondschokenergie en de belasting op het kelderplafond geanalyseerd.

Bij deze analyse werd een massa-veer systeem toegepast om de dynamische respons van het kelderplafond onder explosieve belasting te simuleren. Dit systeem vereenvoudigde de complexe structuur van het plafond tot een model waarin de massa de traagheid van de constructie representeerde en de veer de weerstand tegen doorbuiging. Hiermee kon de verplaatsing en de optredende dwarskracht in het kelderplafond berekend worden tijdens een explosieve impuls. De dwarskracht, die de belasting in het plafond weergeeft, werd vervolgens vergeleken met de toelaatbare waarde om te beoordelen of de constructie bestand is tegen de belasting zonder te bezwijken.

Belangrijke bevindingen zijn dat de bovenliggende lagen een significante dempende werking hebben op de explosieve belasting die het kelderplafond bereikt. Echter, de kans op ponsbreuk, een bezwijkmechanisme dat optreedt bij geconcentreerde krachten zoals explosies, bleek afhankelijk van het type explosie. Voor grotere explosieven zoals de M795 artilleriegranaat, met een TNT-equivalent van 13,57 kg, bleek het kelderplafond te bezwijken op ponsbreuk, terwijl het bij kleinere explosieven zoals de M/50 mortiergranaat niet kwetsbaar zou zijn voor ponsbreuk.

Het rapport concludeert dat zonder structurele verbeteringen het kelderplafond niet volledig kan worden beschouwd als veilig onder zware explosieve dreigingen. De resultaten suggereren dat het kelderplafond versterkt zou moeten worden om een hogere weerstand tegen explosies te garanderen.

Inhoudsopgave

Voorwoord II

Samenvatting III

Inhoudsopgave IV

1. Introductie 1

1.1 Methodologie 1

1.2 Structuur 2

2. Structurele eigenschappen kelder 3

2.1 Indeling en functie kelder 3

2.2 Structurele opbouw 4

2.3 Materialen kelderplafond 5

3. Explosieve belastingen 7

3.1 Definitie en basisprincipes van explosies 7

3.2 Blast golven 8

3.3 Explosielocatie 8

3.4 Realistische explosie 9

3.5 Verschillende mortier- en artilleriegranaten 10

3.6 Blast parameters 10

4. Invloed bovenliggende lagen 13

4.1 Factoren Invloed bovenliggende lagen 13

4.2 Kratervorming 14

4.3 Grondschokenergie en -belasting 15

4.4 Analyse van grondschokenergie en -belasting 17

5. Ponsbreuk 20

5.1 Theoretische achtergrond 20

5.2 Analyse van ponsweerstand 21

6. Dynamische krachtbepaling 23

6.1 Massa-Veer systeem 23

6.2 Stijfheid k en Massa m van het systeem 23

6.3 Aangebrachte kracht 25

6.4 Oplossen systeem 25
6.5 Bezwijkanalyse 27
7. Discussie 28
8. Conclusie en aanbevelingen 29
8.1 Toekomstige onderzoeken 29
Literatuurlijst 30
Bijlage A. Python Code 31
Bijlage B. Turnit-In 38

1. Introductie

De oorlog in Oekraïne heeft de dreiging op conflicten in Europa en andere NAVO-landen laten oplopen. In moderne oorlogen worden steeds vaker raketten en artillerie gebruikt, die grote schade kunnen veroorzaken aan gebouwen, daarom zijn schuilkelders essentieel. Hoewel een directe aanval op de TU Delft campus onwaarschijnlijk lijkt, is het nemen van voorzorgsmaatregelen verstandig.

Dit onderzoek richt zich op de mogelijke gevolgen van een explosie op het kelderplafond van het Civiele Techniek gebouw, dat als een mogelijke schuilkelder kan dienen in tijden van een noodsituatie. Onderzoeken hoe een gebouw reageert op een explosieve kracht is cruciaal voor de bescherming van de infrastructuur.

De centrale vraag van dit onderzoek luidt: **Wat is de impact van een explosie op het kelderplafond van het Civiele Techniek gebouw?**

Om deze vraag te beantwoorden, zijn de volgende deelvragen onderzocht:

1. Wat zijn de geometrische afmetingen en de constructieve opbouw van de kelder?
2. Welke soorten explosieven zijn realistisch en welke drukgolven genereren ze?
3. Hoe beïnvloeden de zandlaag en de rijweg de explosie belasting?
4. Bezwijkt het kelderplafond van het Civiele Techniek gebouw door ponsbreuk?

1.1 Methodologie

In deze sectie wordt de methodologie beschreven die is gebruikt om de impact van explosieve belastingen op het kelderplafond van het Civiele Techniek gebouw te analyseren. Het onderzoek omvat vier hoofdonderdelen: dataverzameling, analyse van explosieven, de invloed van bovenliggende lagen en de beoordeling van het risico op ponsbreuk.

Dataverzameling
De eerste stap was het verzamelen van relevante gegevens over de constructieve opbouw van de kelder en de explosieven die in realistische scenario's konden worden toegepast. Dit omvatte het in kaart brengen van de geometrische afmetingen en materialen van de kelder, er werd ook een gedetailleerde analyse gemaakt van verschillende soorten explosieven en hun explosieve energie.

Analyse van realistische explosieven
Na de dataverzameling werd een analyse uitgevoerd om de uiteindelijke belastingen van de explosieven te berekenen. Hierbij lag de focus op het begrijpen van hoe deze belastingen zich gedragen bij impact op het kelderplafond.

Invloed van bovenliggende lagen
Een belangrijk aspect was ook het onderzoeken van de invloed van bovenliggende lagen, de zandlaag en rijweg, op de explosieve belasting. De materiaaleigenschappen van deze lagen werden geanalyseerd om te bepalen hoe zij kunnen bijdragen aan het verminderen van de grondschok voordat deze het kelderplafond bereikt.

Beoordeling van het risico op ponsbreuk
Tot slot werd het risico op ponsbreuk beoordeeld. Aan de hand van verzamelde gegevens werd onderzocht of het kelderplafond kwetsbaar is voor bezwijken door de geconcentreerde kracht van een explosie. Er werden simulaties uitgevoerd om de dynamische belasting op de constructie te bepalen. Na afloop van het onderzoek werden alle gegevens en bevindingen samengevoegd, wat leidde tot een beter inzicht in de impact van explosieve belastingen op het kelderplafond.

1.2 Structuur

Dit rapport is als volgt gestructureerd: **Hoofdstuk 2** beschrijft de geometrie en constructie van de kelder. **Hoofdstuk 3** behandelt de verschillende explosieven en hun drukgolven. **Hoofdstuk 4** richt zich op de invloed van de bovenliggende lagen op de explosie belasting. In **hoofdstuk 5** wordt de ponsbreukweerstand ven het kelderplafond bepaald. In **hoofdstuk 6** worden de dynamische belasting bepaald met behulp van een massa-veer systeem. In **hoofdstuk 7** worden de resultaten geëvalueerd en in **hoofdstuk 8** worden conclusies en aanbevelingen gepresenteerd.

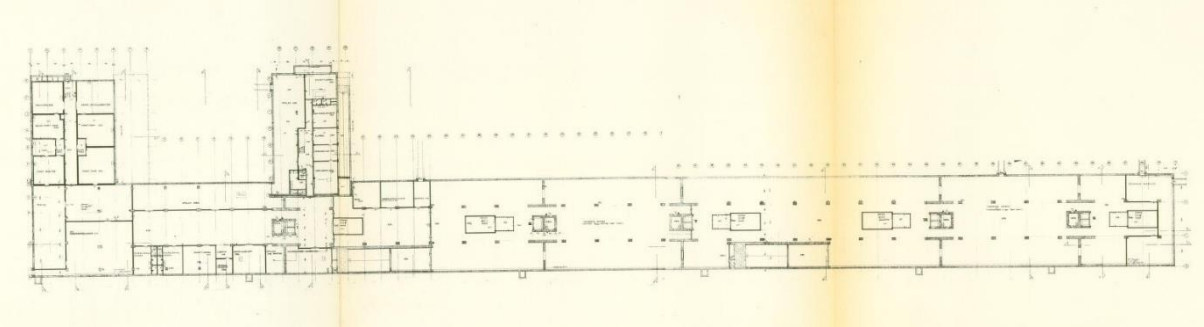
2. Structurele eigenschappen kelder

In dit hoofdstuk worden de structurele eigenschappen van de kelder van het Civiele Techniek gebouw onderzocht. Deze analyse biedt de basis voor het beoordelen van de impact op de kelder door mogelijke explosieve belastingen.

2.1 Indeling en functie kelder

De bouw van het Civiele Techniek gebouw is begonnen in 1964 en in 1975 vond de officiële oplevering plaats. Voormalig werd de afdeling Weg- en Waterbouwkunde ondergebracht in dit gebouw. Het gebouw heeft een lengte van 265 meter, een breedte van 19 meter en een hoogte van 26 meter. Het oorspronkelijke ontwerp bevatte een gebouw van vier verdiepingen, maar doordat men in de jaren 70 ineens veel meer studenten verwachtte, werd tijdens de bouw besloten om de vijfde en zesde verdieping direct te bouwen. Het exterieur van het gebouw is gekenmerkt door de twee grote onderdoorgangen naar de achterliggende laboratoria. (Otakar, Schutten, & . Wegner, 1994)

De kelder van het gebouw strekt zich uit over de volledige lengte en breedte van het gebouw, zoals te zien in Figuur 1. De kelder speelt een cruciale rol in het dagelijks functioneren van de faculteit. Deze ondergrondse ruimte is voornamelijk ingericht voor gebruik door personeel en biedt verschillende faciliteiten. Zo bevat de kelder kleedruimtes, schaftlokalen, verschillende werkplaatsen en een grote fietsenstalling. Daarnaast wordt de kelder gebruikt voor het huisvesten van belangrijke technische installaties, zoals verwarmings-, en ventilatiesystemen en elektrische verdeelstations. De overige ruimtes in de kelder worden gebruikt als opslagplaatsen.



Figuur 1 Plattegrond kelder Civiele Techniek (Van den Broek en Bakema, 1965)

De toegankelijkheid van de kelder wordt gewaarborgd door de meerder ingangen, waaronder vijf trappenhuizen en zeven liften, strategisch verspreid over de lengte van het gebouw. De kelder is ook toegankelijk via een speciale fietsengang, er zijn ook hellingen naar buiten aangelegd voor logistieke doeleinden.

Er is een duidelijk zichtbare en goed doordachte vluchtroute aanwezig, dat is geplaatst op verschillende locaties in de kelder. Dit plan biedt gedetailleerde instructies en routeaanduidingen voor een snelle en veilige evacuatie in geval van nood. Echter, er is momenteel nog geen specifiek plan ontwikkeld voor de situatie waarin personen zo snel mogelijk toegang tot de kelder zouden moeten krijgen tijdens een noodsituatie. Dit aspect van de veiligheidsplanning verdient nadere aandacht, gezien de potentiële rol die de kelder zou kunnen spelen als schuilplaats.

2.2 Structurele opbouw

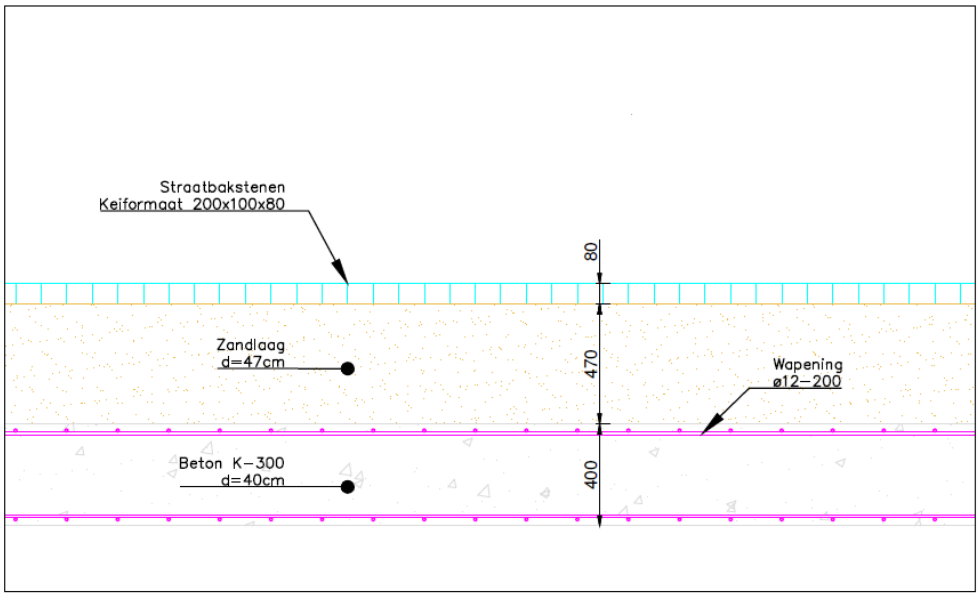
De kelder van het Civiele Techniek gebouw is een voorbeeld van robuuste en doordachte constructie. De fundering van de kelder en de rest van het gebouw wordt gevormd door een netwerk van funderingspalen, onderling verbonden door extra betonnen verbindingsbalken, wat zorgt voor een stabiele ondergrond en een gelijkmatige verdeling van de belasting.

Het kelderplafond, dat tevens fungeert als de vloer van de begane grond, rust op een reeks betonnen kolommen. Deze kolommen, met afmetingen van 50 bij 90 centimeter, zijn geplaatst in een grid-patroon dat de gehele lengte en breedte van het gebouw bestrijkt. In de breedte- en lengterichting staan de kolommen op een hart-op-hart afstand van 7,2 meter. Deze kolommen lopen door het hele gebouw en vormen de ruggengraat van de constructie, waardoor de krachten efficiënt worden overgedragen van de bovenliggende verdiepingen naar de fundering.

De dikte van het kelderplafond varieert door het gebouw heen, afhankelijk van de functie van de bovenliggende ruimtes. Over het algemeen heeft het kelderplafond een robuuste dikte van 40 centimeter. Deze substantiële dikte wordt met name toegepast onder de rijwegen en de begane grond, waar hogere belastingen worden verwacht door verkeer of intensief gebruik. Op plaatsen waar geen grote belastingen worden verwacht, is gekozen voor een slankere constructie met een dikte van 30 centimeter. Dit is bijvoorbeeld het geval in ruimtes die primair worden gebruikt voor lichtere activiteiten of opslag.

Een opmerkelijk kenmerk zijn de twee onderdoorgangen, waar een rijweg onder de eerste verdieping van het gebouw doorloopt. Op deze locaties is het kelderplafond verlaagd om ruimte te maken voor de fundering van de rijweg, die bestaat uit een zandbed. Deze oplossing maakt het mogelijk om de verkeersstroom te integreren in het gebouwontwerp zonder de structurele integriteit van de kelder te compromitteren.

De fundering van de rijweg bij de onderdoorgangen is benodigd om de verkeersbelasting te dragen zonder de kelderstructuur in gevaar te brengen. De opbouw bestaat uit een enkele zandlaag, dit zandbed heeft een dikte van 47 cm, zoals te zien in Figuur 2. De verlaging van het kelderplafond begint ongeveer 4 meter voor de onderdoorgang en loopt geleidelijk af tot een maximale verlaging van 45 centimeter. Deze geleidelijke overgang zorgt ervoor dat de krachten in het kelderplafond gelijkmatig worden overgedragen. De rijweg zelf bestaat uit straatbakstenen van kei formaat.



Figuur 2 Opbouw fundering rijweg onderdoorgang

2.3 Materialen kelderplafond

Het kelderplafond van het Civiele Techniek gebouw is opgebouwd uit gewapend beton, bestaande uit een combinatie van beton en wapeningsstaal. Deze materialen werken samen om de structurele eigenschappen van het plafond te versterken en bieden de vereiste sterkte, stijfheid en stabiliteit die essentieel zijn voor de constructie

Voor de constructie van de kelder en het kelderplafond is gebruik gemaakt van beton met sterkteklasse K300. Deze sterkteklasse komt tegenwoordig ongeveer overeen met C25/30 in de moderne Europese normering. Dit betekent dat het beton een karakteristieke cilinderdruksterkte (f_{ck}) heeft van 25 N/mm² na 28 dagen uitharden. Het beton is samengesteld met cement van klasse A, wat duidt op een hoogwaardige Portland cement met snelle sterkteontwikkeling en hoge eindsterkte. (Nederlandse Vereniging van Journalisten NVJ, 2020)

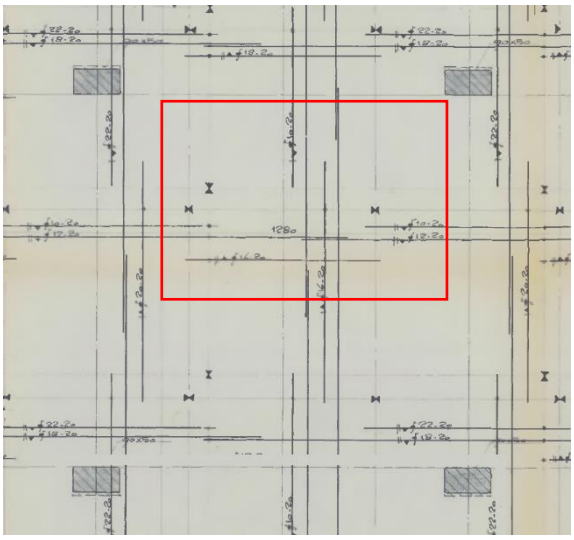
Voor de wapening van het kelderplafond is gebruik gemaakt van QR 42 geribd betonstaal. De QR-aanduiding was gebruikelijk in de periode waarin het gebouw werd ontworpen en geconstrueerd. In moderne termen zou dit staal ongeveer vergelijkbaar zijn met B500B. Het QR 42 staal heeft een karakteristieke vloeigrens (f_{yk}) van 420 N/mm² (of 420 MPa).

In de analyse van het kelderplafond voor een specifiek realistisch scenario wordt afgeweken van de conventionele constructieve ontwerpmethode. In plaats van gebruik te maken van rekenwaarden, die verlaagd zijn door veiligheidsfactoren, worden de karakteristieke waarden gehanteerd. Voor het K300 beton betekent dit dat we rekenen met een karakteristieke druksterkte (f_{ck}) van 25 N/mm², terwijl voor het QR 42 wapeningsstaal de karakteristieke vloeigrens (f_{yk}) van 420 N/mm² wordt gebruikt. Deze benadering geeft een meer realistische weergave van de daadwerkelijke materiaaleigenschappen en maakt het mogelijk om het werkelijke gedrag van de constructie onder de gegeven omstandigheden te beoordelen. (Stichting CURNET, 2012)

Voor het bepalen van de wapeningsverdeling van het kelderplafond onder de rijweg wordt gekeken naar het midden van de plaat. Zoals weergegeven in het bijbehorende Figuur 3, bestaat de wapening uit een dubbel net met verschillende configuraties voor de boven- en onderwapening. De bovenwapening bestaat uit staven met een diameter van 12 mm, geplaatst met een hart-op-hart afstand van 200 mm in beide richtingen. De onderwapening is zwaarder uitgevoerd: parallel aan het gebouw zijn staven met een diameter 14 mm gebruikt, terwijl loodrecht op het gebouw staven met een diameter 16 mm zijn toegepast. In beide richtingen is de hort-op-hart afstand tussen de staven 200 mm. In Tabel 1 zijn de kenmerken van de wapening te zien.

Tabel 1 Wapeningsverdeling kelderplafond onder rijweg

	Parallel aan gebouw	**Loodrecht op gebouw**
Hoogte (mm)	400	400
Lengte (mm)	7200	7200
$A_{s,onder}$ (mm^2/m)	$5 * (\frac{14^2\pi}{4})$	$5 * (\frac{16^2\pi}{4})$
$A_{s,boven}$ (mm^2/m)	$5 * (\frac{12^2\pi}{4})$	$5 * (\frac{12^2\pi}{4})$
Dekking (mm)	32	20



Figuur 3 Wapeningsverdeling kelderplafond onder rijweg (Van den Broek en Bakema, 1965)

3. Explosieve belastingen

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de effecten van een explosie. De focus van dit deel van het onderzoek ligt op het kwantificeren van de drukgolven die door explosieven worden veroorzaakt en het berekenen van de belastingen die deze kunnen uitoefenen. Om een nauwkeurige inschatting te maken van de impact van dergelijke explosies, worden verschillende soorten granaten geanalyseerd op basis van hun explosieve kracht, gewicht en toepassingen.

3.1 Definitie en basisprincipes van explosies

Een explosie is een complex fenomeen dat wordt gekenmerkt door een buitengewoon snelle chemische reactie. Dit proces kan plaatsvinden in vaste stoffen, stofdeeltjes of gassen en resulteert in een zeer snelle vrijlating van energie en hete gassen. Hoewel een explosie slechts enkele milliseconden duurt, genereert het extreme temperaturen en drukken die verstrekkende gevolgen kunnen hebben.

Het kernmechanisme van een explosie draait om de snelle expansie van de geproduceerde hete gassen. Deze gassen streven ernaar het beschikbare volume te vullen, wat leidt tot een golfvormige voortplanting door de ruimte. Dit fenomeen wordt de drukgolf genoemd. Bij een explosie op de grond, ook wel bekend als een oppervlakte-explosie, wordt deze voortplanting echter beïnvloed door de aanwezigheid van het grondoppervlak. (U.S. Army Corps of Engineers, 2008)

Er zijn twee typen chemische reacties die een explosief tot ontploffing kunnen brengen en die worden onderverdeeld naar de snelheid van de verbrandingsreactie:

- Deflagratie is een relatief langzame explosie waarbij de verbranding zich met een snelheid onder de geluidssnelheid (subsonisch) voortplant. Dit resulteert in een (minder krachtige) drukgolf en veroorzaakt dus minder schade. Een voorbeeld hiervan is buskruit, dat een milde drukgolf produceert. Hoewel deflagraties gevaarlijk zijn, is hun destructieve kracht beperkt in vergelijking met detonaties.
- Detonatie is een veel krachtigere explosie waarbij de verbranding supersonisch plaatsvindt, sneller dan de geluidssnelheid. Zodra de verbranding is afgerond heeft al het explosiefmateriaal zich omgezet in een gas met hoge druk. Het expanderen van dit gas zorgt ervoor dat er een schokgolf ontstaat in de omliggende lucht. Explosieven zoals TNT en bommen, vaak gebruikt in militaire operaties, zijn typische voorbeelden van detonaties vanwege hun grote verwoestende kracht. (Mays, 1995)

3.2 Blast golven

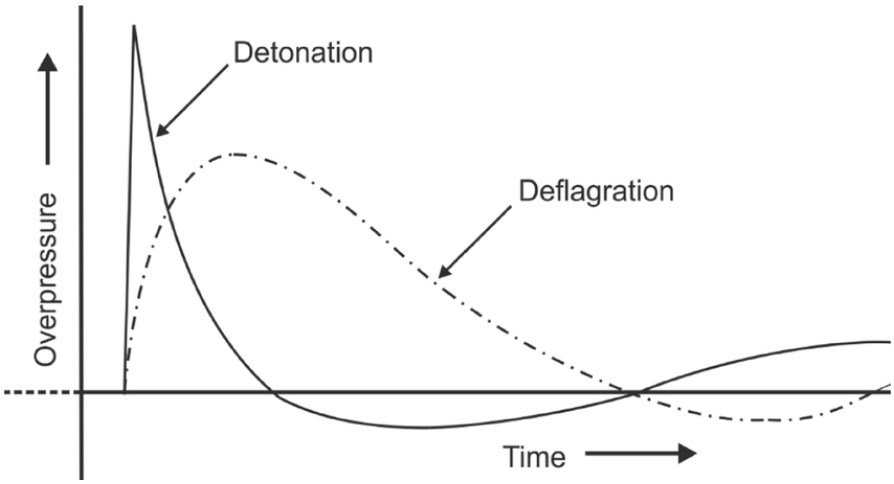
Bij explosies zijn er twee soorten golfvormen te onderscheiden: schokgolven en drukgolven.

Schokgolven ontstaan typisch bij detonaties, zoals bij het exploderen van explosieven of zeer krachtige gasexplosies. Ze kenmerken zich door een onmiddellijke drukverhoging zonder stijgtijd. De druk bereikt onmiddellijk een scherpe piek, gevolgd door een snelle afname. De maximale druk bevindt zich direct aan het front van de golf.

Drukgolven daarentegen zijn kenmerkend voor deflagraties, zoals bij de meeste gasexplosies. Bij een drukgolf vindt de drukopbouw plaats over een bepaalde tijd, de zogenaamde stijgtijd. De golfvorm is geleidelijker, met een minder scherpe piek. De maximale druk bevindt zich niet direct aan het front van de golf. Beide golfvormen worden gekarakteriseerd door een piekoverdruk, een positieve faseduur en een positieve impuls.

Het cruciale verschil zit in de snelheid waarmee de drukverhoging plaatsvindt en de vorm van de druk-tijd curve. Schokgolven zijn doorgaans destructiever vanwege hun abrupte drukverhoging en hogere piekoverdruk.

De vorm van deze golven hangt af van factoren zoals het type en de grootte van de explosie, en de afstand tot het explosiepunt. Na de positieve fase volgt vaak een korte periode van onderdruk, die meestal verwaarloosbaar is in vergelijking met de initiële overdruk.



Figuur 4 Vergelijking detonation en deflagration blast

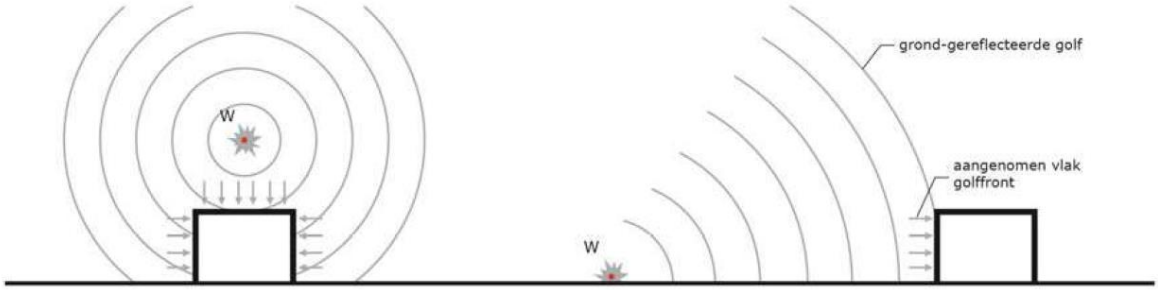
3.3 Explosielocatie

Explosies kunnen worden geclassificeerd op basis van hun locatie waar ze tot ontploffing worden gebracht. Er kan onderscheid gemaakt worden tussen *unconfined* en *confined* explosies. Bij *Unconfined* explosies vindt de explosie plaats in een open omgeving zonder fysieke beperkingen, waardoor de drukgolf zich vrij kan verplaatsen. Een *confined* explosie vindt plaats in een afgesloten ruimte, zoals een gebouw, waarbij de drukgolf niet vrij kan voortbewegen. (U.S. Army Corps of Engineers, 2008)

Unconfined explosies kunnen daarnaast worden onderscheiden in twee situaties: lucht- en oppervlakte-explosies.

Een luchtexplosie (Free air burst), ook wel bekend als een vrije explosie, vindt plaats in de lucht op een zodanige hoogte dat de initiële schokgolf het grondoppervlak bereikt voordat deze wordt gehinderd of gereflecteerd. Bij dit type explosie plant de schokgolf zich sferisch voort vanaf het detonatiepunt. Luchtexplosies worden gekenmerkt door een relatief gelijkmatige verdeling van de explosie-energie over een groter gebied.

Bij een oppervlakte-explosie (surface burst) vindt de explosie plaats op of zeer dicht bij het grondoppervlak. In dit geval raakt de vuurbal daadwerkelijk de grond, wat resulteert in de vorming van een krater en een grondschok. De schokgolf plant zich hemisferisch door de lucht voort en wordt onmiddellijk versterkt door reflectie tegen het grondoppervlak. Dit leidt tot een hogere piekoverdruk in de nabijheid van het detonatiepunt in vergelijking met een luchtexplosie van dezelfde grootte.



Figuur 5 Blast golven voortplanting van een luchtexplosie (links) en een oppervlakte-explosie (rechts)

3.4 Realistische explosie

Voor de beoordeling of de kelder van het Civiele Techniek gebouw geschikt is als schuilkelder, moet er gekeken worden naar welke soorten explosies realistisch zijn in deze tijd. Het is onwaarschijnlijk dat het Civiele Techniek gebouw een doelwit zou zijn tijdens een oorlog, omdat het geen militaire basis, industriële installatie of politiek belangrijk gebouw is. De explosies die realistisch overwogen kunnen worden zullen daarom een lage nauwkeurigheid hebben.

Conventionele wapens die bedoeld zijn voor zware strategische aanvallen, zoals kruisraketten en ballistische raketten, kunnen grotendeels buiten beschouwing worden gelaten. Kleinere conventionele explosies vormen echter wel een realistisch risico, zoals mortieren en artillerie-inslagen. Dit zijn de typen explosies die vaak gebruikt worden in niet-militaire doelwitten, hierbij kan de nauwkeurigheid variëren afhankelijk van de omstandigheden. De explosieve kracht van deze aanvallen kan echter nog steeds aanzienlijke schade aanrichten aan gebouwen. (Evans & Seddon, 2022)

Mortieren en artilleriegranaten zijn munitietypes die explosies veroorzaken met een detonatiekarakteristiek. Dit betekent dat de verbranding supersonisch plaatsvindt, wat resulteert in een schokgolf die zich sneller verspreidt dan de geluidssnelheid. Bovendien kunnen deze explosies worden beschouwd als oppervlakte-explosies, waardoor ze een krater

vormen en de explosieve kracht versterkt wordt door de reflectie van de schokgolf tegen het grondoppervlak.

3.5 Verschillende mortier- en artilleriegranaten

In de context van de huidige oorlog in Oekraïne zijn er verschillende mortier- en artillerie-explosieven die realistisch overwogen kunnen worden. Hieronder worden vijf belangrijke types besproken, die elk hun eigen kenmerken en toepassingen hebben. (Evans & Seddon, 2022)

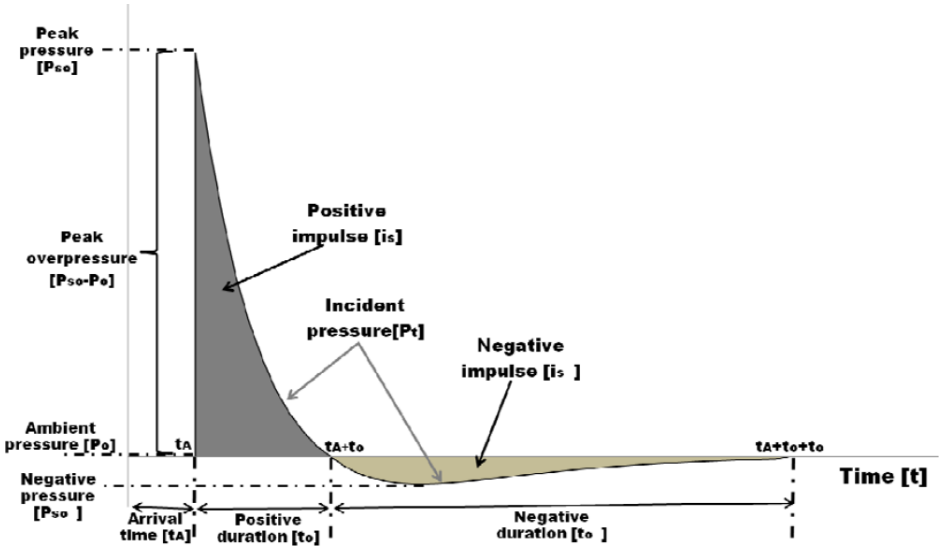
1. **M795 155 mm**:
   De M795 is een veelgebruikte 155mm hoogexplosieve (HE) artilleriegranaat van Amerikaanse origine, ontwikkeld in de jaren '90 ter vervanging van de M107. Met een totaalgewicht van 47,06 kg en een lengte van 748 mm. De granaat bevat 10,94 kg Composition B of IMX-101 explosieve vulling, waarbij recentere versies meestal IMX-101 bevatten. De M795 wordt typisch uitgerust met M739A1 schokbuizen, dat is een mechanische neusbuis die bij impact functioneert. De M795 kan een bereik van meer dan 30 kilometer hebben.
2. **OF45 152 mm**:
   De OF-45 is een veelgebruikte 152mm hoogexplosieve fragmentatiegranaat (HE-FRAG) van Russische origine, ontwikkeld in de jaren '80. Met een totaalgewicht van 43,56 kg een lengte van 864 mm. Deze granaat bevat 7650 g A-IX-2 explosieve vulling en wordt meestal uitgerust met een RGM-2 schokbuis. Het bereik ligt rond de 25 kilometer.
3. **M/50 120 mm Mortier**:
   De M/50 is een 120mm hoogexplosieve (HE) mortiergranaaat van Zweedse origine. Met een totaalgewicht van 13,8 kg en een lengte van 590 mm. De granaat bevat 2325 g TNT explosieve vulling met een versterker van geplastificeerd RDX, en wordt meestal uitgerust met een M/49 schokbuis. Het bereik van de M/50 ligt tussen de 7 en 10 kilometer.
4. **OF49 120mm Mortier (L16)**:
   De OF49 is een 120mm hoogexplosieve fragmentatiemortiergranaat (HE-FRAG) van Russische origine. Met een totaalgewicht van 17,2 kg en een lengte van 590 mm, is deze granaat uniek onder Russische mortieren vanwege zijn vooraf gesneden trekken in plaats van een gladde loop. De OF49 bevat 4900 g A-IX-2 explosieve vulling en wordt doorgaans uitgerust met een M-12 schokbuis die door terugstoot wordt geactiveerd. Het bereik van deze mortiergranaat varieert afhankelijk van het gebruikte wapensysteem, maar ligt typisch tussen de 7 en 9 kilometer voor 120mm mortieren.

3.6 Blast parameters

Bij zowel mortier- als artillerie-explosies ontstaat een krachtige schokgolf die zich vanuit het explosiecentrum verspreidt. De piekoverdruk, oftewel de maximale druk boven de atmosferische druk, is een belangrijke maatstaf voor de impact van de explosie. Deze

piekoverdruk kan variëren afhankelijk van verschillende factoren, zoals het type explosief, de afstand tot het detonatiepunt en de omgeving waarin de explosie plaatsvindt.

De schokgolf kan worden gekarakteriseerd door een snelle stijging naar de piekoverdruk, gevolgd door een geleidelijke afname. Dit resulteert in een positieve fase waarin de druk hoger is dan normaal, gevolgd door een negatieve fase waarin onderdruk ontstaat. De duur van deze fasen is cruciaal voor het bepalen van de schade aan structuren; langere positieve faseduren kunnen leiden tot ernstigere schade. Figuur 6 toont het profiel van de druk in relatie tot de tijd in het geval van een vrije-lucht schokgolf.



Figuur 6 Geïdealiseerde schokgolf druk-tijd profiel

De berekening van schokgolven bij explosies kan worden uitgevoerd met behulp van verschillende formules en modellen. Een veelgebruikte methode is gebaseerd op de Friedlander-curve, die de relatie tussen tijd en druk beschrijft voor een ideale explosie in open lucht. De Friedlander-vergelijking voor de overdruk als functie van de tijd wordt gegeven door:

$$P_s(t) = P_{s0}\left(1 - \frac{t}{t_0}\right)e^{-b\frac{t}{t_0}} \quad (1)$$

Waarin:

- $P_s(t)$ is de overdruk op tijdstip t
- P_{s0} is de initiële piekoverdruk
- t is de tijd sinds het begin van de explosie
- t_0 is de duur van de positieve fase
- b is een vervalconstante die de vorm van de curve bepaalt

Naast de piekdruk is de impuls van de schokgolf een nog belangrijkere parameter, omdat deze direct verband houdt met de totale kracht die door de explosie op een constructie wordt uitgeoefend. De impuls wordt gedefinieerd als het gearceerde gebied onder de overdruk-tijdcurve, zoals weergegeven in Figuur 6.

We onderscheiden twee soorten impulsen: de positieve impuls (i_s) en de negatieve impuls (i_s^-), die overeenkomen met de respectieve fasen van het tijdsverloop van de schokgolf. Voor het gebouwen is de positieve impuls van groter belang dan de negatieve. De vergelijking voor de positieve impuls wordt gegeven door:

$$i_s = \int_{t_A}^{t_A+t_0} P_s(t)\, dt \tag{2}$$

Voor de Friedlander-vergelijking kan de positieve impuls analytisch berekend worden met de volgende vergelijking:

$$i_s = \frac{P_{s0} t_0}{b^2}[b - 1 + e^{-b}] \tag{3}$$

De initiële piekoverdruk van explosieven kan worden berekend met behulp van de TNT-equivalentie, waarbij TNT (Trinitrotoluene) als referentiepunt dient. Dit is omdat de explosieve eigenschappen van TNT representatief zijn voor veel andere vaste explosieven. De berekening maakt gebruik van de verhouding van de warmte die vrijkomt tijdens de detonatie van het gekozen explosief in vergelijking met die van TNT.
De formule voor het berekenen van het equivalente TNT-gewicht is als volgt:

$$W_{TNT} = W_{exp}(\frac{H_{exp}}{H_{TNT}}) \tag{4}$$

Waarin:

- W_{TNT} is het equivalente gewicht TNT $[kg]$
- W_{exp} is het gewicht van het betreffende explosief $[kg]$
- H_{exp} is de detonatiewarmte van het betreffende explosief $[J]$
- H_{TNT} is de detonatiewarmte van TNT $[J]$

Deze TNT-equivalentie maakt het mogelijk om de effecten van verschillende explosieven te vergelijken en te voorspellen. Het is echter belangrijk op te merken dat deze methode een vereenvoudiging is en dat de werkelijke effecten kunnen variëren afhankelijk van de specifieke omstandigheden van de explosie. De TNT-equivalent gewichten van de artilleriegranaten zijn te zien Tabel 2.

Tabel 2 TNT-equivalentie van verschillende explosieve ladingen

Explosief	**Explosieve lading**	**Gewicht [kg] W_{exp}**	**TNT-equivalent [kg] W_{TNT}**
M795	Composition B	10.94	13.566
OF45	A-IX-2	7.65	11.781
M/50	TNT	2.33	2.325
OF49	A-IX-2	4.9	7.546

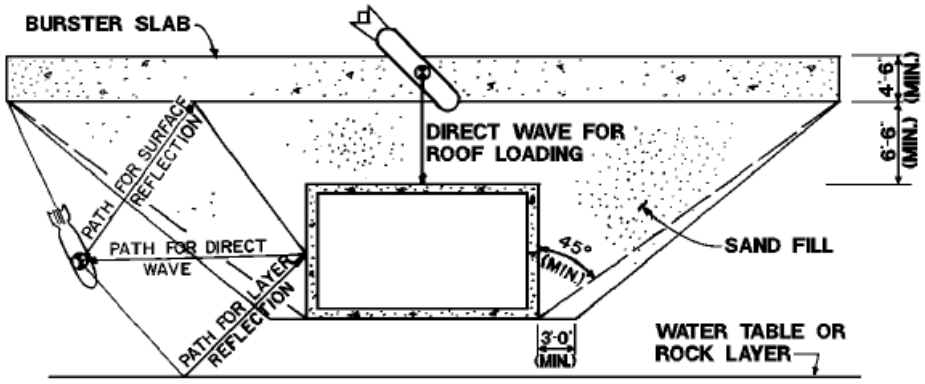
4. Invloed bovenliggende lagen

De plaatsen waar een directe artillerie-inslag plaats zou kunnen vinden, zijn de onderdoorgangen van het gebouw. Op die plekken heeft de kelder een verlaagd kelderplafond met daarbovenop een zandlaag en rijweg, bestaande uit straatbakstenen. In Figuur 7 is een vergelijkbare situatie te zien. Deze bovenliggende lagen hebben een significante invloed op de voortplanting en intensiteit van een schokgolf veroorzaakt door een oppervlakte-explosie. Deze combinatie van materialen fungeert als een complexe beschermende barrière die de energie van de schokgolf aanzienlijk vermindert voordat deze het betonnen plafond bereikt.

4.1 Factoren Invloed bovenliggende lagen

Bij het onderzoeken van de effecten van explosies op een ondergrondse structuur is het essentieel om inzicht te krijgen in de verschillende factoren die de overdracht en verspreiding van energie beïnvloeden. Een explosie aan de oppervlakte resulteert in complexe interacties tussen de vrijgekomen energie en het omringende materiaal. Hierbij spelen verschillende mechanismen een rol in het energieverlies en de overdracht van energie naar de bodem.

Een belangrijk concept bij het analyseren van explosie-effecten is de ''ground shock coupling factor''. Deze factor geeft aan welk percentage van de explosie-energie wordt omgezet in grondschokken die zich door de bodem voortplanten. Deze factor is sterk afhankelijk van de diepte van het explosiecentrum in de grond. Bij een oppervlakte-explosie gaat ongeveer de helft van de energie verloren in de lucht, terwijl de andere helft de grond ingaat.



Figuur 7 Artillerie-inslag op ondergrondse constructie (Kinney & Graham, 1962)

Een belangrijk fenomeen dat optreedt bij (oppervlakte)-explosies is kratervorming. Dit proces absorbeert een aanzienlijk deel van de explosie-energie door het verplaatsen en fragmenteren van bodemmateriaal. De grootte en vorm van de krater hangen af van factoren zoals de explosiekracht, de diepte van de explosie en de eigenschappen van de bodem.

Het belangrijkste effect van een explosie voor de belasting op ondergrondse constructies is de grondschok. De grondschok is een schokgolf die zich door de bodem voortplant na een explosie. Deze is nauw verbonden met kratervorming, aangezien beide voortvloeien uit dezelfde energieoverdracht. De intensiteit van de grondshock beïnvloedt de omvang van de krater, terwijl de kratergrootte een indicator kan zijn voor de sterkte van de grondschok.

Naast kratervorming speelt demping een cruciale rol bij het afzwakken van de explosie-energie naarmate deze zich door de bodem voortplant. Demping wordt veroorzaakt door de interne wrijving en plastische vervorming van het bodemmateriaal. De mate van demping varieert afhankelijk van de bodemsamenstelling, dichtheid en vochtgehalte.

Het begrijpen van deze concepten en hun onderlinge relaties is essentieel voor het nauwkeurig voorspellen van de explosiebelasting op de ondergrondse structuur. Door rekening te houden met energieverliezen door kratervorming en demping, en door de juiste toepassing van koppelingscoëfficiënten, kan er een betere inschatting gemaakt worden van de belasting op het kelderplafond.

4.2 Kratervorming

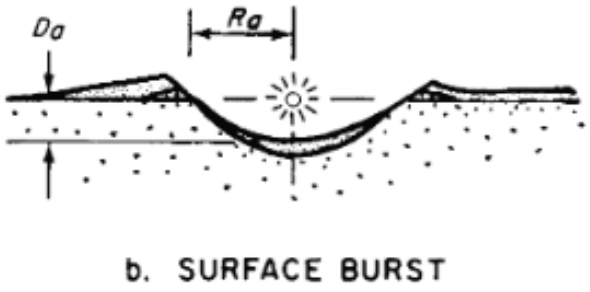
In de context van dit onderzoek wordt uitgegaan van een explosie op een rijweg bestaande uit straatbakstenen. Deze specifieke situatie kent complexe interacties, aangezien er beperkte informatie beschikbaar is over de energieverliezen die optreden bij het verbrijzelen en verplaatsen van de straatbakstenen door een explosie.

Volgens (Kinney & Graham, 1962) is de kratervorming afhankelijk van de diepte van de explosie in de grond, in dit scenario wordt er uitgegaan van een oppervlakte explosie, waarbij het explosiecentrum zich net boven de grond bevindt. Bij een oppervlakte explosie is de kratervorming primair afhankelijk van de netto explosie-energie. Een studie over meer dan 200 explosie bied een formule voor de diameter van de krater (d) in meters in relatie tot de TNT-equivalent (W) in kg:

$$d = 0.8\, W^{\frac{1}{3}} \tag{5}$$

De diepte van de krater gecreëerd door een oppervlakte explosie is vastgesteld op een kwart van de diameter, op basis van vele experimenten. De dimensies van de krater gecreëerd door een oppervlakte explosie zijn te zien in Figuur 8. Het volume van de krater is een hemisfeer die berekend kan worden met de standaard volume vergelijking:

$$V_{p0} = \frac{2}{3}\pi r_{reff}^3 \;;\; r_{reff}^3 = \; r_y^2\, r_x \tag{6}$$



Figuur 8 Dimensies krater door oppervlakte explosie

De berekende dimensies gecreëerd door de verschillende artilleriegranaten zijn te zien in Tabel 3. De uitgebreide berekeningen zijn te zien in Bijlage A.

Tabel 3 Kraterdimensies voor de verschillende artilleriegranaten

Explosief	$W_{TNT}\ [kg]$	$D\ [m]$	$H\ [m]$	$V_{p0}\ [m^3]$
M795	13.57	1.908	0.477	0.455
OF45	11.78	1.820	0.455	0.395
M/50	2.33	1.061	0.265	0.078
OF49	7.55	1.569	0.392	0.252

4.3 Grondschokenergie en -belasting

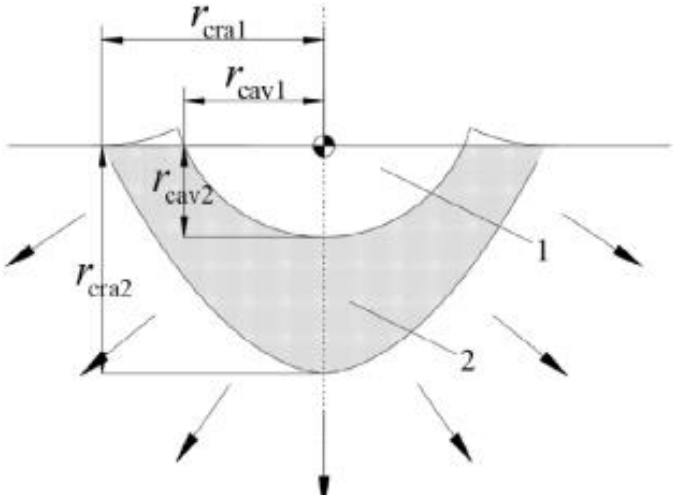
Een interessant aspect van kratervorming is dat het volume van de krater kan worden gebruikt om de intensiteit van de grondschok te bepalen. Deze relatie biedt een waardevolle methode om de impact van de explosie op ondergrondse structuren te beoordelen. Bij een oppervlakte explosie, waarvan de dimensie van de krater te zien zijn in Figuur 9, wordt de energie boven het explosiecentrum verspreid in de lucht, en de grondschokenergie bevindt zich alleen in de halve ruimte onder het explosiecentrum. Daarom is de effectieve energie gelijk aan de totale energie.

De grondschokenergie verwijst naar de kinetische energie van de beweging van het medium. De energie die naar de grond wordt uitgestraald is volledig gelijk aan de arbeid dat door de spanning in het medium op het schadeoppervlak wordt verricht, zoals te zien is in Figuur 9. De grens van de schadezone heeft een paraboolvorm. (Benjun & Xiaohui, 2024) De grondschokenergie kan berekend worden met:

$$W_{s0} = \frac{B_*}{12}\frac{\tau_s^2}{G}\frac{c_p^2}{c_s^2}V_{p0} \tag{7}$$

Waarin:

- $B_* = \left[\frac{5+3(1+24\nu)^2}{64}\right]$, ν is de Poisson's ratio van het medium $[-]$
- τ_s is de schuifsterkte van het medium $[Pa]$
- G is de schuifmodulus van het medium $[Pa]$
- c_p en c_s respectievelijk de snelheid van de longitudinale en de schokgolven zijn in het medium $[m/s]$
- $V_{p0} = \frac{4\pi r_c^3}{3}$ is het volume van het medium binnen de grens van het schadebereik. $[m^3]$



Figuur 9 Grondschokenergie uitstraling vanaf schadeoppervlakte

Aan de hand van de totale grondschokenergie die uitgestraald wordt kan de piekdeeltjessnelheid (v_{pk}) in het medium bepaald worden. Voor een oppervlakte explosie kan de grondschok worden berekend met de formule:

$$v_{pk} = K_N \left(\frac{r}{Q_{eff}^{1/3}}\right)^{-n} \tag{8}$$

Waarin:

- v_{pk} de piekdeeltjessnelheid is $[m/s]$
- r de afstand van de constructie tot het schadeoppervlakte van de krater. $[m]$
- Q_{eff} de effectieve explosie energie is, die in dit scenario gelijk is aan de grondschokenergie (W_{s0}) $[J]$
- K_N en n zijn dempingsparameters zijn, die door experimenten zijn bepaald voor verschillende grondsoorten $[-]$

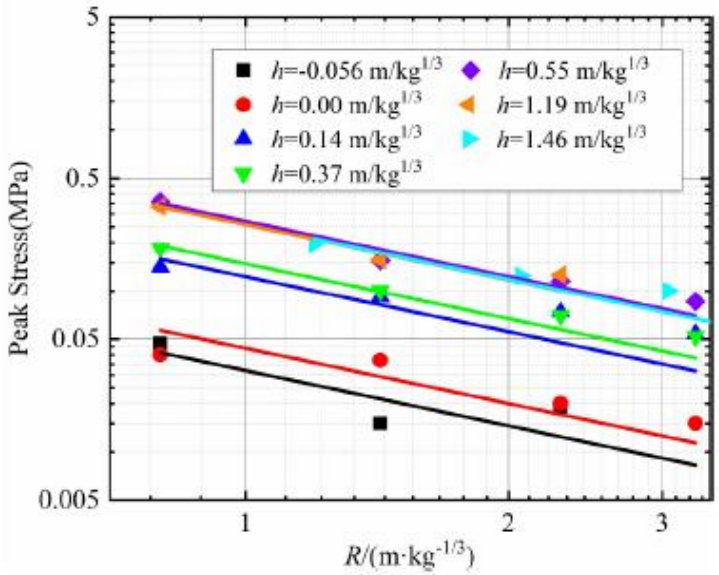
De grondschokspanning is essentieel bij het beoordelen van de effecten van explosies op ondergrondse betonnen constructies. Het wordt gebruikt voor het toetsen van de veiligheid en het voorspellen van schade aan de constructie. Deze hangt af van de deeltjessnelheid en de eigenschappen van het medium. In Figuur 10 zijn experimentele resultaten te zien voor de

piek grondschokspanning ten opzichte van de geschaalde afstand tot het explosiecentrum, voor verschillende explosiedieptes. De grondschokspanning (σ_{pk}) kan uitgedrukt worden als:

$$\sigma_{pk} = p_0 \, c_p \, v_{pk} \tag{9}$$

Waarin:

- σ_{pk} de piekspanning is $[Pa]$
- p_0 de initiële dichtheid van het medium is $[kg/m^3]$
- c_p de snelheid van de longitudinale golf is $[m/s]$



Figuur 10 Piekspanningen ten gevolgen van oppervlakte- en begraven explosies.

4.4 Analyse van grondschokenergie en -belasting

Voor het berekenen van de grondschokenergie en -belasting zijn specifieke grondeigenschappen vereist. De Poisson's ratio en de snelheden van schokgolven in zand zijn experimentele waarden die afhankelijk zijn van de dichtheid (Laine & Sandvik, 2001). De schuifsterkte en de schuifmodulus kunnen worden bepaald met de formules:

$$\tau_s = \sigma' \tan \emptyset \;\; [KPa]$$
$$G = A \, f(e) \, \sigma^n \; [MPa] \tag{10, 11}$$

Hierin is σ' de effectieve normaalspanning, die voor een rijweg met middelzwaar verkeer gesteld kan worden op 200 kPa. De interne wrijvingshoek Ø heeft voor een zandlaag met 7,5% vochtgehalte een waarde van 25 graden. A is een constante met de waarde 200 en n is ook een constante met een waarde van 0,5, voor een zandlaag met een fijne korrelstructuur. De formule van $f(e)$ hangt af van het poriëngehalte e, het poriëngehalte is gemiddeld 0,75 voor een zandlaag onder een rijweg (Tika & Kalioglou, 2003). In Tabel 4 zijn de experimentele en berekende specifieke grondeigenschappen te zien.

Tabel 4 Grondeigenschappen zandlaag

Grondsoort	$\boldsymbol{p_0}$ $[\boldsymbol{k/m^3}]$	$\boldsymbol{\nu}$ $[-]$	$\boldsymbol{\tau_s}$ $[\boldsymbol{KPa}]$	$\boldsymbol{G}$ $[\boldsymbol{MPa}]$	$\boldsymbol{c_p}$ $[\boldsymbol{m/s}]$	$\boldsymbol{c_s}$ $[\boldsymbol{m/s}]$
Zand	1900	0.25	93.26	103.06	1100	1800

De waarden van de dempingsparameters K_N en n, zijn benodigd voor het berekenen van de piekdeeltjessnelheid, deze waarden zijn experimentele waarden en zijn afhankelijk voor de begraven diepte van het explosief. In dit onderzoek wordt er uitgegaan van een oppervlakte explosie, hiervoor is K_N gelijk aan 0,038 en n is gelijk aan 1,05. (Benjun & Xiaohui, 2024)

Met vergelijkingen 7, 8 en 9 en de waarden van de grondeigenschappen en het kratervolume, zijn de grondschokenergie, de piekdeeltjessnelheid en de piek grondschokspanning ter hoogte van de constructie voor de M795 artilleriegranaat berekend:

$$W_{s0} = \frac{B_*}{12}\frac{\tau_s^2}{G}\frac{c_p^2}{c_s^2}V_{p0} = \frac{2.375}{12}\frac{92260^2}{103.06 * 10^6}\frac{1100^2}{1800^2}0.455 = 2.775\ J$$

$$v_{pk} = K_N\left(\frac{r}{Q_{eff}^{1/3}}\right)^{-n} = 0.038\left(\frac{0.053}{2.775^{\frac{1}{3}}}\right)^{-1.05} = 1.187\ m/s$$

$$\sigma_{pk} = p_0\ c_p\ v_{pk} = 1900 * 1100 * 1.187 * 10^{-6} = 2.480\ MPa$$

Deze waarden zijn ook berekend voor de andere artilleriegranaten, deze berekeningen zijn te zien in Bijlage A. De uitkomsten van de berekeningen zijn te zien in Tabel 5.

Tabel 5 Grondschokenergie en -spanning

Explosief	$\boldsymbol{W_{s0}}$ $[\boldsymbol{J}]$	$\boldsymbol{V_{p0}}$ $[\boldsymbol{m^3}]$	$\boldsymbol{v_{pk}}$ $[\boldsymbol{m/s}]$	$\boldsymbol{\sigma_{pk}}$ $[\boldsymbol{MPa}]$
M795	2.775	0.455	1.187	2.480
OF45	2.410	0.395	0.789	1.642
M/50	0.477	0.078	0.118	0.247
OF49	1.544	0.252	0.355	0.741

Om de uiteindelijke belasting op het kelderplafond te bepalen, wordt de piek grondschokspanning (σ_{pk}) vermenigvuldigd met het belastingsoppervlak (A_b). Bij deze berekening wordt aangenomen dat de kracht zich verspreidt onder een hoek van 45 graden vanaf het inslagpunt.

$$F_{v,explosie} = \sigma_{pk} * A_b \tag{12}$$

Het belastingsoppervlak wordt bepaald door de verspreidingshoek van 45 graden en de diepte van het kelderplafond. De diepte van het kelderplafond is gelijk aan de hoogte van de zandlaag en straatbakstenen, die is in dit geval gelijk aan 530 mm. Als de diepte van het kelderplafond met h wordt aangeduid, dan kan het belastingsoppervlak worden berekend als:

$$A_b = \pi * h^2 = \pi * 530^2 = 882473.4 \ mm^2$$

Met behulp van de berekende grondschokspanningen en het bepaalde belastingsoppervlak kan de optredende kracht op het kelderplafond bepaald worden voor elk type explosief. De berekende waarden zijn te zien in Tabel 6, de volledige berekeningen zijn te zien in Bijlage A.

Tabel 6 Optredende explosieve belasting

Explosief	$\boldsymbol{\sigma_{pk}}$ $[\boldsymbol{MPa}]$	$\boldsymbol{F_{v,explosie}}$ $[\boldsymbol{kN}]$
M795	2.480	2188.8
OF45	1.642	1448.9
M/50	0.247	218.2
OF49	0.741	654.2

Het is cruciaal om te begrijpen dat deze belasting geen statische belasting is, maar een zeer kortstondige impuls. Volgens U.S. Army Corps of Engineers (2008) wordt de tijdsduur van een grondschok door een directe inslag gesteld op ongeveer 30 milliseconden. Dit is aanzienlijk hoger dan voor een schokgolf, dit kan leiden tot grotere vervormingen van de constructie. Dit onderstreept het belang van een dynamische analyse die rekening houdt met het tijdsafhankelijke karakter van de belasting en de respons van de constructie.

5. Ponsbreuk

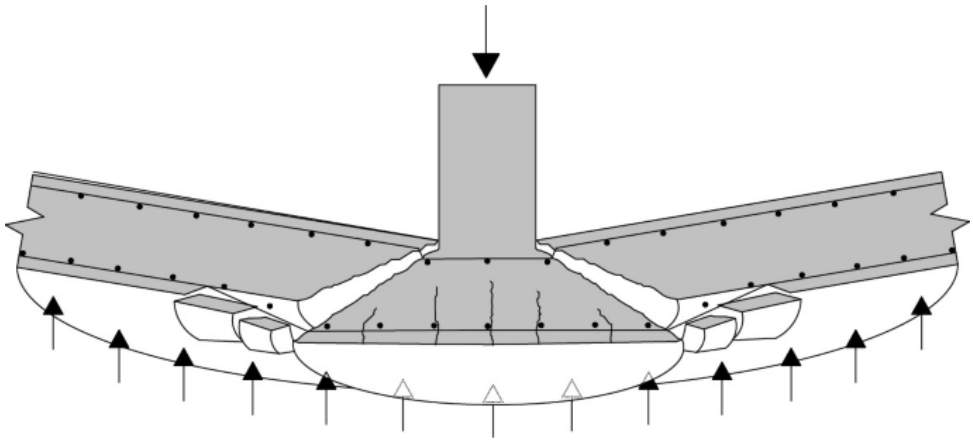
Bij de analyse van de impact van een explosie op het kelderplafond is ponsbreuk een cruciale bezwijkvorm die bijzondere aandacht verdiend. Ponsbreuk treedt op wanneer een geconcentreerde last of impuls het lokaal doorponsen van de betonplaat veroorzaakt. Dit bezwijkmechanisme is bijzonder relevant voor explosiebelastingen vanwege hun geconcentreerde en kortdurende aard.

5.1 Theoretische achtergrond

Ponsbreuk is een kritisch bezwijkmechanisme dat kan optreden in betonnen platen of vloeren onder geconcentreerde belastingen. Het bezwijkproces begint met de vorming van cirkelvormige (tangentiële) scheuren langs de omtrek van de kolom. Vervolgens ontstaan scheuren in radiale richting. Bij toenemende belasting ontwikkelen zich nieuwe cirkelvormige scheuren op kortere afstand van de kolom. Op een bepaald belastingsniveau vormt zich een schuine afschuifscheur in het inwendige deel van de plaat. Deze scheur kan zich verder openen en voortplanten wanneer een deel van de plaat verticaal beweegt ten opzichte van de omringende plaat.

Deze verticale beweging is alleen mogelijk wanneer de segmenten tussen de radiale scheuren onderling roteren. Deze rotatie wordt tegengewerkt door de wapening die de scheuren kruist. Uiteindelijk ponst de kolom door de plaat heen, waarbij een kegelvormig deel van de plaat wordt weggedrukt. Het is belangrijk op te merken dat bezwijken door ponsbreuk kan optreden voordat de buigwapening vloeit.

Dit ingewikkelde breukproces, ook wel "punching shear" genoemd, is een belangrijk aandachtspunt bij het ontwerpen van vlakke vloeren en constructies met puntlasten. Het vereist nauwkeurige berekeningen en kan worden beheerst door de plaat juist te dimensioneren en speciale dwarskrachtwapening aan te brengen rond de kolom-plaat verbinding. (Sucharda, 2018)



Figuur 11 Kegelvormige ponsbreuk mechanisme

5.2 Analyse van ponsweerstand

Bij het analyseren van ponsbreuk als gevolg van een explosie, wordt de explosiebelasting gemodelleerd als een geconcentreerde kracht die inwerkt op een beperkt oppervlak van het betonplafond. Dit is vergelijkbaar met de belastingsituatie van een kolom op een vlakke betonplaat, maar met enkele cruciale verschillen die voortkomen uit de dynamische aard van de explosie.

Om de dynamische effecten van de explosiebelasting mee te nemen, wordt een dynamische vergrotingsfactor (DIF) geïntroduceerd voor zowel de betonsterkte (f_{ck}) als de vloeispanning (f_{yk}) van het wapeningsstaal. Deze factor houdt rekening met de verhoogde materiaalsterkte bij hoge belastingsnelheden. De DIF voor beton onder een schuifkracht is 1,10 en de DIF voor wapeningsstaal onder schuifweerstand is ook 1,10. (U.S. Army Corps of Engineers, 2008)

Voor de berekening van de ponsbreukweerstand wordt de methode uit Eurocode 2 (EN 1992-1-1) gebruikt als uitgangspunt, maar deze dient aangepast te worden om rekening te houden met de dynamische effecten. De basisformule voor de ontwerpschuifweerstand van een element zonder afschuifwapening (VRd,c) volgens Eurocode 2 is:

$$v_{Rd,c} = C_{Rd,c}\, k\, (100\rho_l f_{ck} DIF)^{1/3} + k_1 \sigma_{cp} \tag{13}$$

Met een minimum van:

$$v_{min} = 0{,}0035\, k^{3/2}\, (f_{ck} DIF)^{\frac{1}{2}} \tag{14}$$

Waarin:

- k is een grootte effect parameter: $k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2{,}0 \;\; (d \; in \; mm)$
- ρ_l is de relatieve wapeningsverhouding: $\rho_l = \sqrt{\rho_{lx}\rho_{ly}} \leq 0{,}02$ [%]
- σ_{cp} is de normale betonspanning: $\sigma_{cp} = \frac{\sigma_{cy} + \sigma_{cz}}{2}$ $[MPa]$

De waarden van $C_{Rd,c}$ en k_1 zijn coëfficiënten. Voor $C_{Rd,c}$ wordt 0,12 gebruikt en voor k_1 wordt 0,15 gebruikt. De normale betonspanning (σ_{cp}) kan buiten beschouwing gelaten worden.

Met de beschreven vergelijkingen en de constructieve eigenschappen uit Sectie 2 kan de ontwerpschuifweerstand berekend worden:

$$v_{Rd,c} = 0.12 * 1.74\, (100 * 0.0015 * 30 * 1.1)^{\frac{1}{3}} = 0.358\, MPa$$

$$v_{min} = 0{,}0035\, k^{3/2}\, (f_{ck} DIF)^{\frac{1}{2}} = 0.0035 * 368^{\frac{3}{2}} (30 * 1.1)^{\frac{1}{2}} = 0.462\, MPa$$

De schuifweerstand van het kelderplafond is het maximum van de berekende waarden uit vergelijkingen 13 en 14, wat resulteert in een schuifweerstand van $0.462\ MPa$.

De totale ponsbreukweerstand van het kelderplafond is afhankelijk van het belastingsoppervlak en de effectieve diepte, deze ponsbreukweerstand kan gezien worden als een verticaal optredende kracht en kan berekend worden met de volgende vergelijking:

$$V_{Rd,c} = v_{Rd,c} * d_{eff} * u \quad (15)$$

Waarin:

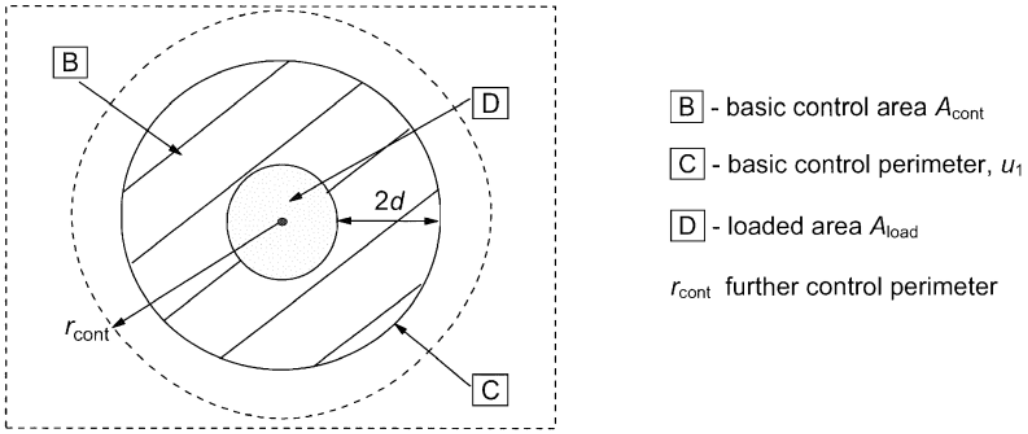
- $v_{Rd,c}$ de maximale schuifweerstand is van het kelderplafond $[MPa]$
- d_{eff} de effectieve diepte is van het kelderplafond $[mm]$
- u de omtrek is van de kegelvormige breuk $[mm]$

De effectieve diepte van de plaat is constant aangenomen en is het gemiddelde van de effectieve dieptes van de onderwapening in twee orthogonale richtingen. De effectieve diepte van de onderwapening parallel aan het gebouw wordt aangeduid met d_x en heeft een waarde van 357 mm. De effectieve diepte van de onderwapening loodrecht op het gebouw wordt aangeduid met d_y en heeft een waarde van 373 mm. Hiervoor geldt dat de effectieve diepte van het kelderplafond gelijk is aan:

$$d_{eff} = \frac{d_x + d_y}{2} = \frac{357 + 373}{2} = 365\ mm$$

De omtrek van de kegelvormige breuk (u), te zien in Figuur 12, is ook afhankelijk van het belastingsoppervlak en de effectieve diepte, omdat de straal van de omtrek gelijk is aan de som van de straal van het belastingsoppervlak (h) en twee keer de effectieve diepte (d_{eff}). Aan de hand van deze verhouding kan de omtrek als volgt berekend worden:

$$u = 2\pi(h + 2d_{eff}) = 2\pi(530 + 2 * 365) = 7916.8\ mm$$



Figuur 12 Omtrek kegelvormige breuk (CEN, 2004)

Het invullen van deze waarden in vergelijking 15 resulteert in de volgende berekening van totale ponsbreukweerstand:

$$V_{Rd,c} = 0.462 * 365 * 7916.8 * 10^{-3} = 1333.8\ kN$$

6. Dynamische krachtbepaling

Dit hoofdstuk beschrijft de benadering van de grondschok door middel van een massa-veer systeem, waarmee de dynamische krachten ten gevolge van de explosieve belasting zijn bepaald. Het doel van deze benadering is om de impact van de grondschok te simuleren en uiteindelijk een bezwijkanalyse uit te voeren die vergelijkt of de optredende dwarskracht ($F_{v,Ed}$) kleiner is dan de ponsbreukweerstand (V_{Rdc}).

6.1 Massa-Veer systeem

Om de dynamische respons van het kelderplafond onder de explosieve belastingen te modelleren is een massa-veer systeem ontworpen. Dit systeem vereenvoudigt de complexe structuur van de constructie tot een enkele massa met een veer, waarbij de massa de traagheid van het plafond representeert en de veer de weerstand van het materiaal tegen vervorming simuleert. Deze benadering maakt het mogelijk om de verplaatsingen en de optredende dwarskrachten in het systeem door een explosieve impuls te berekenen.

Het massa-veer systeem met één vrijheidsgraad wordt gemodelleerd door een tweede-orde differentiaalvergelijking die de verplaatsing (u) en acceleratie ($\ddot{u}$) van de massa beschrijft onder invloed van de explosieve belasting . De vergelijking kan als volgt worden weergegeven:

$$m\ddot{u} + ku = F_{v,explosie}(t) \tag{16}$$

De parameter m is de massa van het systeem, die in dit scenario gelijk is aan de massa van de ponskegel. De parameter k is de veerconstante van het systeem, in dit scenario is die gelijk aan de weerstand tegen doorbuiging van het kelderplafond.

De optredende dwarskracht in de constructie kan berekend worden met de vergelijking:

$$F_{v,Ed}(t) = k * u(t) \tag{17}$$

6.2 Stijfheid k en Massa m van het systeem

De stijfheid van het systeem beschrijft de stijfheid van het kelderplafond en geeft de weerstand tegen vervorming aan. De stijfheid is de verhouding tussen de kracht en de doorbuiging, om de doorbuiging van het kelderplafond te bepalen wordt er gebruik gemaakt van het vergeet-me-nietje voor een puntlast in het midden van een ingeklemde balk. Aan de hand van deze doorbuiging kan de stijfheid van het systeem herschreven worden als: (CEN, 2004)

$$k = \frac{F}{u}; \quad u = \frac{1}{192}\frac{Fl^3}{EI} \quad \rightarrow \quad k = 192\frac{EI}{l^3} \tag{18}$$

Waarin:

- EI de buigstijfheid is van het kelderplafond $[Nmm^2]$
- l de lengte is van het kelderplafond (=7200) $[mm]$

Om de stijfheid van het systeem te bepalen dient eerst de buigstijfheid (EI) van het kelderplafond berekend te worden. Voor het bepalen van de buigstijfheid wordt er een denkbeeldige strip van het kelderplafond onder beschouwing genomen met een breedte van 3 meter. De buigstijfheid kan bepaald worden met de vergelijking:

$$EI = \frac{M_{pl}}{\kappa} \tag{19}$$

Waarin:

- M_{pl} de plastische momentcapaciteit is van het kelderplafond $[Nmm]$
- κ de kromming is van het kelderplafond bij de plastische momentcapaciteit $[mm^{-1}]$

De plastische momentcapaciteit en de kromming van het kelderplafond kan berekend worden met de volgende drie vergelijkingen:

$$M_{pl} = A_s * f_{yd} * (d_{eff} - \beta * x_u) \tag{20}$$

$$x_u = \frac{A_s * f_{yd}}{\alpha * b * f_{cd}} \tag{21}$$

$$\kappa = \frac{\varepsilon_c}{x_u} \tag{22}$$

Waarin:

- A_s het oppervlakte is van wapening onder trek in de strip (=3195) $[mm^2]$
- α een constante is (=0.75) $[-]$
- β een constante is (=7/18) $[-]$
- b de breedte van de strip is (=3600) $[mm]$
- ε_c de indrukking is van het beton bij De plastische momentcapaciteit ($= 3.5 * 10^{-3}$)

Met de gegeven waarden kunnen vergelijking 18, 19, 20, 21 en 22 worden ingevuld en berekend.

$$x_u = \frac{A_s * f_{yd}}{\alpha * b * f_{cd}} = \frac{3195 * 420}{0.75 * 3000 * 30} = 16.6\, mm$$

$$M_{pl} = A_s * f_{yd} * \left(d_{eff} - \beta * x_u\right) = 3195 * 420 * \left(365 - \frac{7}{18} * 16.6\right) = 4.8 * 10^8\, Nmm$$

$$\kappa = \frac{\varepsilon_c}{x_u} = \frac{3.5 * 10^{-3}}{16.6} = 2.1 * 10^{-4}\, mm^{-1}$$

$$EI = \frac{M_{pl}}{\kappa} = \frac{4.8 * 10^8}{2.1 * 10^{-4}} = 2.28 * 10^{12}\, Nmm^2$$

$$k = 192\frac{EI}{l^3} = 192\frac{2.28 * 10^{12}}{7200^3} = 1171.5\ Nmm^{-1}$$

De massa van het massa-veer systeem vertegenwoordigt de traagheid van het deel van het kelderplafond dat onderhevig is aan verplaatsing door de explosieve belasting. De massa wordt berekend op basis van de ponskegel van het plafond, aangezien dit het kritieke deel van de constructie is dat het meeste effect ondervindt van de belasting, hierbij is de volgende vergelijking toegepast:

$$m = \rho * V \tag{23}$$

Waarin:

- ρ de dichtheid is van beton (=2500) $[kg/m^3]$
- V het volume is van de ponskegel (=1.01) $[m^3]$

$$m = \rho * V = 2500 * 1.01 = 2525\ kg$$

6.3 Aangebrachte kracht

De explosieve belasting wordt gemodelleerd als een impulsieve kracht die over een korte tijdsperiode op het massa-veer systeem werkt. Deze kracht simuleert de impact van de grondschok veroorzaakt door de explosie en wordt toegepast als een tijdsafhankelijke kracht $F_{v,explosie}(t)$, die gedurende een vooraf bepaalde duur een maximale waarde bereikt en daarna abrupt stopt.

De kracht werkt slechts gedurende een zeer korte tijdsperiode, aangeduid als de belastingsduur. Deze periode is gebaseerd op de verwachte duur van de grondschok en bedraagt 40 milliseconden. Na deze tijdsperiode wordt aangenomen dat de kracht nul is en het systeem vrij oscilleert.

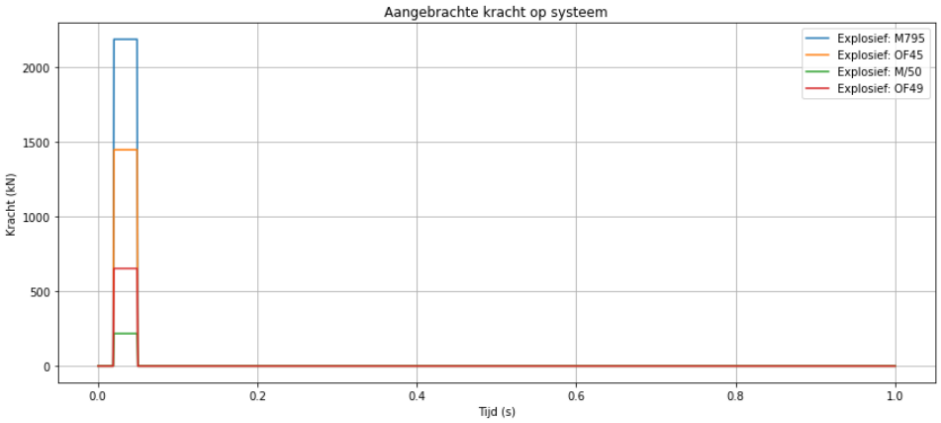
$$F_{v,explosie}(t) = F_{v,explosie} \quad voor\ t_{aankomst} \leq t \leq t_{aankomst} + t_{belastingsduur}$$

Hierbij is $F_{v,explosie}$ de maximale kracht die de verschillende explosies veroorzaken, die bepaald zijn in Sectie 4.4. De tijdsafhankelijke kracht is te zien in Figuur 13.

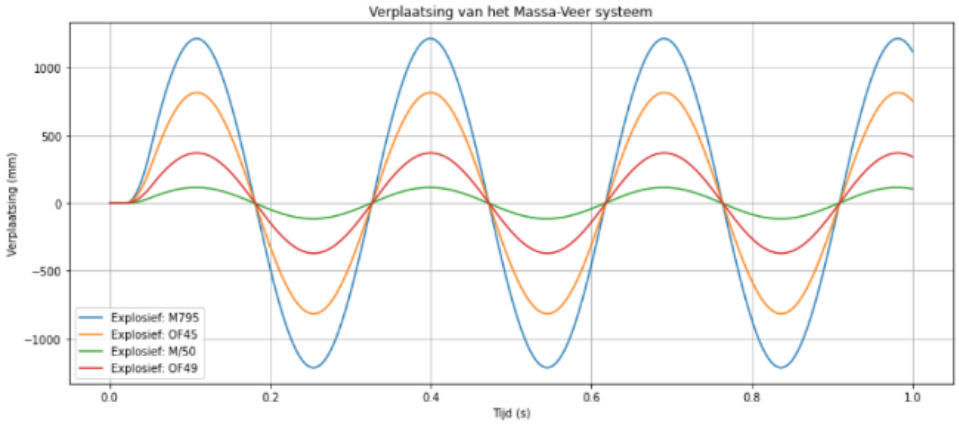
6.4 Oplossen systeem

Voor het berekenen van de verplaatsing en krachten in het massa-veer systeem is gebruik gemaakt van de numerieke oplossingsmethode $scipy.solve.ivp$ uit de Python-bibliotheek SciPy. Deze functie maakt het mogelijk om de differentiaalvergelijkingen van het massa-veer systeem nauwkeurig en efficiënt op te lossen. De gekozen integratiemethode binnen $solve.ivp$ is de Runge-Kutta-methode (RK45), die door adaptieve tijdstappen de nauwkeurigheid optimaliseert en de fout minimaliseert. Deze methode is bijzonder geschikt voor het simuleren van dynamische systemen onder kortdurende belasting, zoals de impulsieve kracht van een explosie. De startsnelheid en -positie zijn beide gesteld op nul.

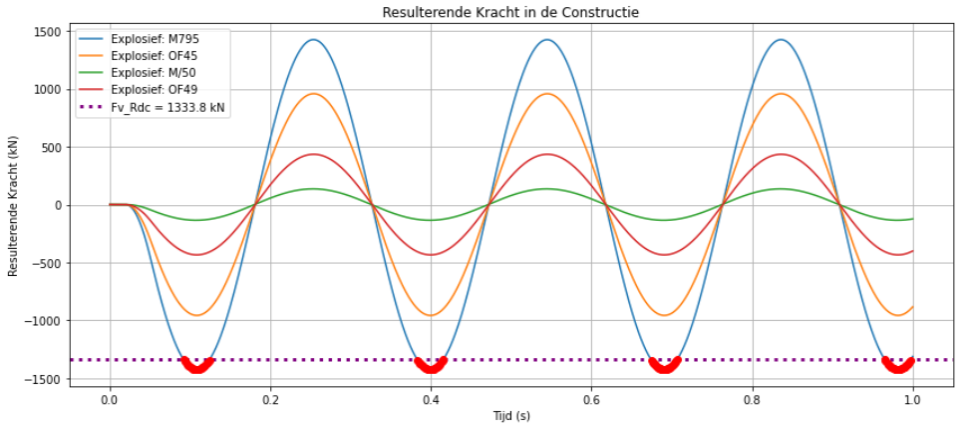
Het massa-veer systeem is opgelost voor de vier verschillende artilleriegranaten. De Figuur 14 laat de verplaatsing van de massa zien en Figuur 15 geeft de optredende dwarskracht in de constructie weer ten gevolgen van de verschillende explosieve belastingen.



Figuur 13 Explosieve belasting over de tijd



Figuur 14 Verplaatsing massa-veer systeem



Figuur 15 Optredende dwarskracht in de constructie

6.5 Bezwijkanalyse

De veiligheid tegen ponsbreuk wordt gewaarborgd als de optredende dwarskracht ten gevolge van de explosieve impuls belasting lager blijft dan de totale ponsweerstand: $F_{v,Ed} \leq V_{Rd,c}$. Als aan deze voorwaarde wordt voldaan, kan worden geconcludeerd dat de constructie voldoende weerstand biedt tegen ponsbreuk onder de gegeven explosiebelasting. Indien de optredende dwarskracht hoger is dan de weerstand, zouden er aanvullende maatregelen nodig, zoals het vergroten van de plaatdikte of het toevoegen van dwarskrachtwapening.

In Figuur 15 is een paarse stippenlijn weergegeven, deze lijn vertegenwoordigt de ponsbreukweerstand van de constructie. Hieraan is te zien dat deze waarde maar voor één explosief de ponsbreukweerstand overschreden wordt, namelijk de M795. In Tabel 7 zijn de maximale optredende dwarskrachten te zien voor elk explosief. Hierin is nogmaals te zien dat het kelderplafond alleen voor de artilleriegranaat M795 bezwijkt op ponsbreuk.

Tabel 7 Optredende dwarskracht in vergelijking met de ponsweerstand

Explosief	$\boldsymbol{W_{TNT}\ [kg]}$	$\boldsymbol{F_{v,Ed}\ [kN]}$	$\boldsymbol{V_{Rd,c}\ [kN]}$
M795	13.57	1423.86	1333.77
OF45	11.78	956.93	1333.77
M/50	2.33	135.48	1333.77
OF49	7.55	434.14	1333.77

7. Discussie

In dit onderzoek is uitgebreid gekeken naar de belasting op het kelderplafond van het Civiele Techniek gebouw van de TU Delft onder verschillende explosieve scenario's. De resultaten van dit onderzoek laten zien dat er significante spanningen op de bovenkant van de constructie ontstaan, vooral bij zware explosieve zoals de M795 artilleriegranaten. Dit hoofdstuk bespreekt de belangrijkste bevindingen en onzekerheden in de analyse.

Een belangrijk punt van aandacht is dat in dit onderzoek slechts één type bezwijkanalyse is onderzocht: de ponsbreuk. Hoewel deze vorm van analyse cruciaal is voor centrale piekspanningen, zijn er in de praktijk meerdere vormen van bezwijkanalyses die ook relevant kunnen zijn zoals, doorbuiging. Het beperken van de analyse tot alleen ponsbreuk kan een incompleet beeld geven van de werkelijke risico's en kwetsbaarheden van de kelderconstructie.

Bovendien is het belangrijk om te erkennen dat er een complexe interactie bestaat tussen de explosieve belasting en de bovenliggende lagen, zoals zand en rijweg. De dikte van deze lagen is relatief beperkt, wat betekent dat hun dempende effect mogelijk niet voldoende is om de impact van een explosie effectief te reduceren.

Daarnaast zijn er in dit onderzoek enkele versimpelde aannames gedaan in de gebruikte formules. Deze aannames kunnen invloed hebben op de nauwkeurigheid van de resultaten. Een belangrijk aspect dat niet in deze analyse is meegenomen, is de inslagsnelheid van explosieven. In werkelijkheid kan deze factor leiden tot verschillende reacties in de constructie.

Deze discussie laat zien dat, hoewel het onderzoek waardevolle inzichten heeft geboden over de impact van explosieve belastingen op kelderplafonds, er nog meer onderzoek nodig is. Door meerdere bezwijkanalyses te integreren en te kijken naar de complexe interacties tussen verschillende lagen, kunnen er richtlijnen ontwikkelen voor het ontwerp en gebruik van ondergrondse schuilplaatsen in moderne conflictgebieden.

8. Conclusie en aanbevelingen

Dit onderzoek richtte zich op de vraag of de kelder van het Civiele Techniek gebouw aan de TU Delft als schuilkelder kan dienen in geval van een explosie. Uit de analyses blijkt dat de kelderstructuur in staat is om weerstand te bieden aan kleinere explosies, zoals die veroorzaakt door mortiergranaten, maar dat het kelderplafond kwetsbaar is voor grotere explosieven zoals artilleriegranaten van het type M795.

Het kelderplafond zal bezwijken op ponsbreuk bij een impact van dergelijke zware explosieven. De dempende werking van de bovenliggende lagen (zandlaag en rijweg) is niet voldoende om de impact van een zware explosie voldoende te dempen. Daarom kan de kelder in de huidige staat niet als veilig worden beschouwd bij zwaardere explosieve dreigingen.

Om de kelder geschikt te maken als schuilkelder tegen zwaardere explosieve belastingen, wordt aanbevolen om het kelderplafond te versterken. Dit kan gerealiseerd worden door de dikte van de betonnen platen op strategische locaties te vergroten en extra dwarskrachtwapening toe te voegen, vooral in gebieden waar de kans op ponsbreuk het grootst is.

8.1 Toekomstige onderzoeken

Voor toekomstig onderzoek zijn er verschillende interessante onderwerpen uit te voeren. Een belangrijk onderzoek zou het gebruik van numerieke simulaties zijn om de complexe interacties tussen explosieve krachten, de kelderstructuur en de bovenliggende grondlagen beter te begrijpen. Met behulp van deze simulaties kunnen de dynamische effecten van explosies beter gemodelleerd worden, waaronder de verspreiding van grondschokgolven door verschillende bodemlagen.

Daarnaast zou het combineren van verschillende soorten bezwijkanalyses, zoals voor doorbuiging en scheurvorming, een vollediger beeld geven van hoe het kelderplafond zich gedraagt onder diverse belastingcondities. Het meenemen van dynamische factoren, zoals de inslagsnelheid, zou deze analyse nog verder kunnen verdiepen.

Ook is verder onderzoek naar de rol van de verschillende grondlagen, zoals de zandlaag en de rijweg, van groot belang. Deze lagen hebben een aanzienlijke invloed op het dempen van de explosieve kracht voordat die de kelder bereikt. Beter inzicht in deze interacties kan helpen bij het versterken van de kelderconstructie en het vergroten van de veiligheid.

Literatuurlijst

Benjun, S., & Xiaohui, X. (2024). *Experimental and numerical study on explosion cratering and coupled.* Jiangsu: Army Engineering University of PLA.

CEN. (2004). *Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1 : General rules and rules for buildings.* Brussel: CEN.

DeHaan, J. D. (n.d.). *Deflagrations vs. Detonations*. Retrieved from interfire: https://www.interfire.org/res_file/def_det.asp

Evans, R., & Seddon, B. (2022). *Explosive Ordnance Guide for Ukraine.* Chernihiv, Ukraine: GICHD.

Kinney, G., & Graham, K. (1962). *Explosive shocks in air 2nd edition.* New York: The Macmilan Company.

Laine, L., & Sandvik, A. (2001). *Derivation of mechanical properties for sand.* Norwegen: ANKER – ZEMER Engineering.

Mays, G. (1995). *Blast effects on buildings.* London: Thomas Telford Publications.

Nederlandse Vereniging van Journalisten NVJ. (2020). *Sterkteklasse bij beton*. Retrieved from Joostdevree: https://www.joostdevree.nl/shtmls/sterkteklasse.shtml

Otakar, M., Schutten, I., & . Wegner, J. (1994). *Architectuurarchief Technische Universiteit Delft.* TU Delft: Publicatiebureau Bouwkunde.

Stichting CURNET. (2012). *Onderzoek en beoordeling van de constructieve veiligheid van uitkragende betonnen vloeren van galerijflats.* Gouda: Platform Constructieve Veiligheid.

Sucharda, O. (2018). *Punching Shear Failure of Concrete Ground Supported Slab.* University of Ostrava: International Journal of Concrete Structures and Materials.

Tika, T., & Kalioglou, P. (2003). *Shear modulus and damping of natural sands.* Lisse: Swets & Zeitlinger,.

U.S. Army Corps of Engineers. (2008). *UFC 3-340-02 Structures to Resist the Effects of.* U.S. Army Corps of Engineers, Naval Facilities Engineering Command.

Van den Broek en Bakema. (1965). *Architectenbureau Van den Broek en Bakema / Archief*. Retrieved from Nieuwe Instituut: https://zoeken.nieuweinstituut.nl/nl/archieven/details/BROX/path/911.1

Bijlage A. Python Code

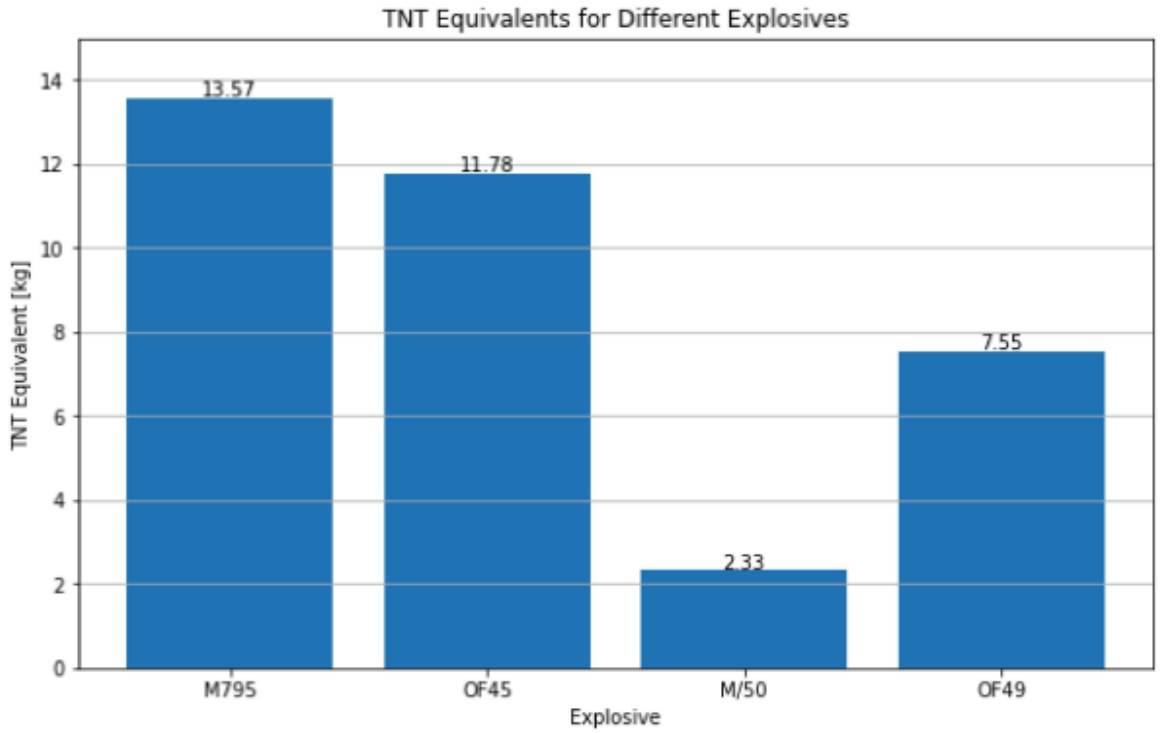
```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
```

```
explosives = {
    'TNT': 4.184e6,
    'A-IX-2': 6.44e6,
    'Composition B': 5.19e6,
}

explosive_weight = {
    'M795': 10.94,
    'OF45': 7.65,
    'M/50': 2.33,
    'OF49' : 4.9
}

Q_tnt = 4.184e6  # Heat of detonation of TNT (J/kg)
```

```
def tnt_equivalent(Q_exp, Q_tnt):
    return Q_exp / Q_tnt

def tnt_weight(k, Wexp):
    return Wexp * k

# Calculate and plot TNT equivalents
tnt_equivalents = {name: tnt_equivalent(Q, Q_tnt) for name, Q in explosives.items()
tnt_eqweights = {name: tnt_weight(1, Wexp) for name, Wexp in explosive_weight.items
```

```
nm = []
for keys in tnt_eqweights.keys():
    nm.append(keys)
```

```
Wexp = []
Wexp.append(10.94 * 1.24)
Wexp.append(7.65 * 1.54)
Wexp.append(2.33 * 1.0)
Wexp.append(4.9 * 1.54)

plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.bar(tnt_eqweights.keys(), Wexp)
plt.title('TNT Equivalents for Different Explosives')
plt.xlabel('Explosive')
plt.ylabel('TNT Equivalent [kg]')
plt.ylim(0, 15)
for i, v in enumerate(Wexp):
    plt.text(i, v + 0.05, f'{v:.2f}', ha='center')
plt.grid(True, axis='y')
plt.show()
```




```
d = []
h = []
r = []
for i in range(len(Wexp)):
    d.append(0.8 * Wexp[i] ** (1/3)) #krater diameter [m]
    h.append(0.25 * d[i]) #krater diepte [m]
    r.append(0.53 - h[i]) #overgebeleven zandlaag hoogte [m]
    print(f"{nm[i]}: Diamater krater: {d[i]:.3f} [m], Diepte krater: {h[i]:.3f} [m]
```

```
M795: Diamater krater: 1.908 [m], Diepte krater: 0.477 [m], Overgebleven zandlaag:
0.053 [m]
OF45: Diamater krater: 1.820 [m], Diepte krater: 0.455 [m], Overgebleven zandlaag:
0.075 [m]
M/50: Diamater krater: 1.061 [m], Diepte krater: 0.265 [m], Overgebleven zandlaag:
0.265 [m]
OF49: Diamater krater: 1.569 [m], Diepte krater: 0.392 [m], Overgebleven zandlaag:
0.138 [m]
```

```
def volume(d, h):
    volume = []
    for i in range(len(d)):
        volume.append(2/3 * np.pi * (h[i]**2 * (d[i] / 2))) #[m^3]
        print(f"{nm[i]}: Volume krater: {volume[i]:.3f} [m^3]")
    return volume
volume = volume(d,h)
```

```
M795: Volume krater: 0.455 [m^3]
OF45: Volume krater: 0.395 [m^3]
M/50: Volume krater: 0.078 [m^3]
OF49: Volume krater: 0.253 [m^3]
```

```
v = 0.25
tau = 92260 #Pa
G = 103060000 #Pa
cp = 1100 #m/s
cs = 1800 #m/s

def ground_energy(v, tau, G, cp, cs, Vp0):
    Bs = ((5 + 3*(1+24*0.25)**2) / 64)
    Ws0 = []
```

```
    for i in range(len(d)):
        Ws0.append(((Bs / 12) * (tau**2 / G) * (cp**2 / cs**2)) * volume[i])
        print(f"{nm[i]}: Grondschokenergie: {Ws0[i]:.3f}")
    return Ws0
Ws0 = ground_energy(v, tau, G, cp, cs, volume)
```

```
M795: Grondschokenergie: 2.775
OF45: Grondschokenergie: 2.410
M/50: Grondschokenergie: 0.477
OF49: Grondschokenergie: 1.544
```

```
Kn = 0.038
n = 1.05
p0 = 1900 #[kg/m^3]

def piekbelasting(Kn, n, r, Ws0, p0, cp):
    vp = np.zeros(len(d))
    sigp = np.zeros(len(d))
    for i in range(len(d)):
        vp[i] = Kn * (r[i] /(Ws0[i]**(1/3))) ** (-1*n)  #
        sigp[i] = p0 * cp * vp[i] * 10**(-6)  #[N/mm^2] of [MPa]
    return vp, sigp

vp = piekbelasting(Kn, n, r, Ws0, p0, cp)[0]
sigp = piekbelasting(Kn, n, r, Ws0, p0, cp)[1]
for i in range(len(d)):
    print(f"{nm[i]}: Peikgrondsnelheid: {vp[i]:.3f} [m/s], Piek grondspanning op r=
```

```
M795: Peikgrondsnelheid: 1.187 [m/s], Piek grondspanning op r=0.53m: 2.480 [MPa]
OF45: Peikgrondsnelheid: 0.786 [m/s], Piek grondspanning op r=0.53m: 1.642 [MPa]
M/50: Peikgrondsnelheid: 0.118 [m/s], Piek grondspanning op r=0.53m: 0.247 [MPa]
OF49: Peikgrondsnelheid: 0.355 [m/s], Piek grondspanning op r=0.53m: 0.741 [MPa]
```

```
c = 500 #[mm] doorsnede belastingsvlak
cov = 20 #[mm]
h = 400 #[mm]
diax = 12 #[mm]
diay = 12 #[mm]
s = 200 #[mm]
beta = 1.0
f_ck = 30 #[n/mm2]
k_1 = 0.1
sigma_cp = 0 #[n/mm2]
```

```
c = 500 #[mm] doorsnede belastingsvlak
cov = 20 #[mm]
h = 400 #[mm]
diax = 12 #[mm]
diay = 12 #[mm]
s = 200 #[mm]
beta = 1.0
f_ck = 30 #[n/mm2]
k_1 = 0.1
sigma_cp = 0 #[n/mm2]
```

```
dx = h - diax / 2 - cov #[mm]
dy = dx - diay #[mm]
deff = (dx + dy) / 2 #[mm]
u1 = 2 * np.pi * (c / 2 + 2 * deff) #[mm]
```

```
k = 1 + np.sqrt(200 / deff) #[mm]
Axx = (diax**2 * np.pi) / 4 * (1000 / s) #[mm^2]
Ayy = (diay**2 * np.pi) / 4 * (1000 / s) #[mm^2]
rho_x = Axx / (dx * 1000) #[%/100]
rho_y = Ayy / (dy * 1000) #[%/100]
rho_l = np.sqrt(rho_x * rho_y) #[%/100]
```

```
v_rdc = 0.12 * k * (100 * rho_l * f_ck)**(1/3) + k_1 * sigma_cp #[Mpa]  of [N/mm2]
v_min = 0.035 * k**(3/2) * f_ck**0.5 + k_1 * sigma_cp #[MPa] of [N/mm2]
```

```
v_rc = max(v_rdc, v_min)
print(f'Schuifweerstand van het betonnen kelderplafond {v_rc:.3f} MPa')
```

```
Schuifweerstand van het betonnen kelderplafond 0.460 MPa
```

```
sigpk = piekbelasting(Kn, n, r, Ws0, p0, cp)[1]
Fved = []
Fvrdc = []
def force(d):
    for i in range(len(sigpk)):
        Fved.append((sigpk[i] * (np.pi * (c/2)**2))*10**(-3))  #Spanning * Oppervlakte belasti
        Fvrdc.append((v_rc * d * (u1)*10**(-3)))  #Schuifweerstand [MPa] * effectieve diepte *
    return Fved, Fvrdc
force(deff)
for i in range(len(sigpk)):
    print(f"{nm[i]}: Optredende explosie belasting (Fv_Ed): {Fved[i]:.2f} [kN]")
print(f"Schuifweerstand beton (Fv_Rdc): {Fvrdc[i]:.2f} [kN]")
```

```
M795: Optredende explosie belasting (Fv_Ed): 2188.80 [kN]
OF45: Optredende explosie belasting (Fv_Ed): 1448.87 [kN]
M/50: Optredende explosie belasting (Fv_Ed): 218.19 [kN]
OF49: Optredende explosie belasting (Fv_Ed): 654.18 [kN]
Schuifweerstand beton (Fv_Rdc): 1333.77 [kN]
```

```
A_s = (Axx + Ayy) * 3.6 / 2
f_yd = 420
b = 3600
l = 7200
density = 2500 #kg/m3
print(A_s)

def func_4(cover, A_s):
    d = deff
    x_u = (A_s * f_yd) / (0.75 * b * f_ck)                                  #[mm]
    Mpl = A_s * f_yd * (d - (7/18) * x_u)                                   #[Nmm]
    kappa4 = (3.5 * 1e-3) / (x_u)                                           #[1/mm]
    EI4 = Mpl / kappa4                                                      #[Nmm^2]
    k_stif = 192 * EI4 / (l)**3                                             #[N/mm]
    massa = (((c + (c + 4 *deff)) / 4)**2 * np.pi * h)*10**(-9) * density  #kg
    volume = (((c + (c + 4 *deff)) / 4)**2 * np.pi * h)*10**(-9)          #m3
    return Mpl, kappa4, EI4, x_u, k_stif, massa, volume

Mpl, kappa4, EI4, x_u, k_stif, massa, volume = func_4(cov, A_s)
print(Mpl, kappa4, EI4, x_u, k_stif, massa, volume)
```

```
3194.9997287008196
481148144.8780465 0.0002112676235733124 2277434359037.424 16.566665259930176 1171.5197320151358 2516.494255341764
```

```
def eigen_freq(m, k):
    w0 = np.sqrt((k*1000)/(m))
    freq = w0 / (2*np.pi)
    T = 1 / freq
    return w0, freq, T

eigen_freq(massa, k_stif)
```

```
(21.57629305879169, 3.433973693906048, 0.29120782193952344)
```

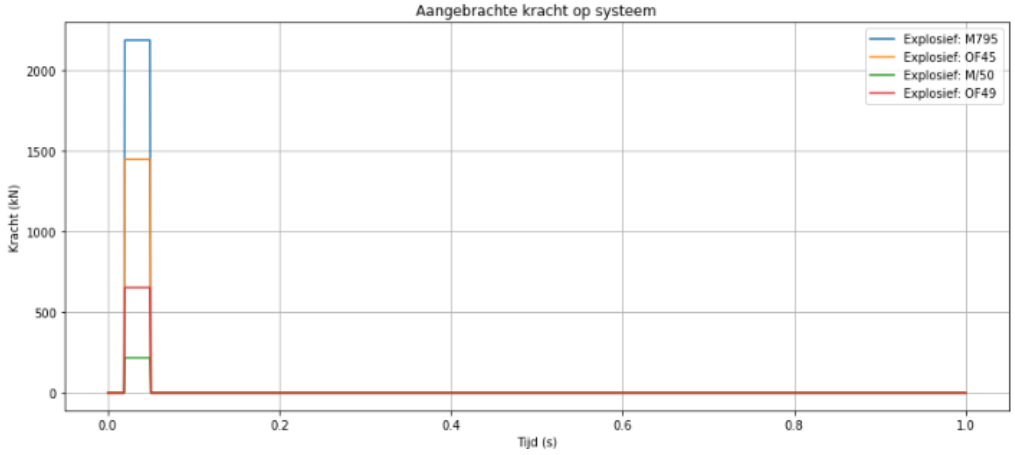
```
from scipy.integrate import solve_ivp

m = func_4(cov, A_s)[5]            # massa kegel [kg]
k = func_4(cov, A_s)[4] *1000      # stijfheid strip [N/m]
Belastingstijd = 0.03              # [s]
ta = 0.02
tt = 1

sigpk = piekbelasting(Kn, n, r, Ws0, p0, cp)[1]
Fved = [(sigpk[i] * (np.pi * (c/2)**2))  for i in range(len(sigpk))]  #Newtons
```

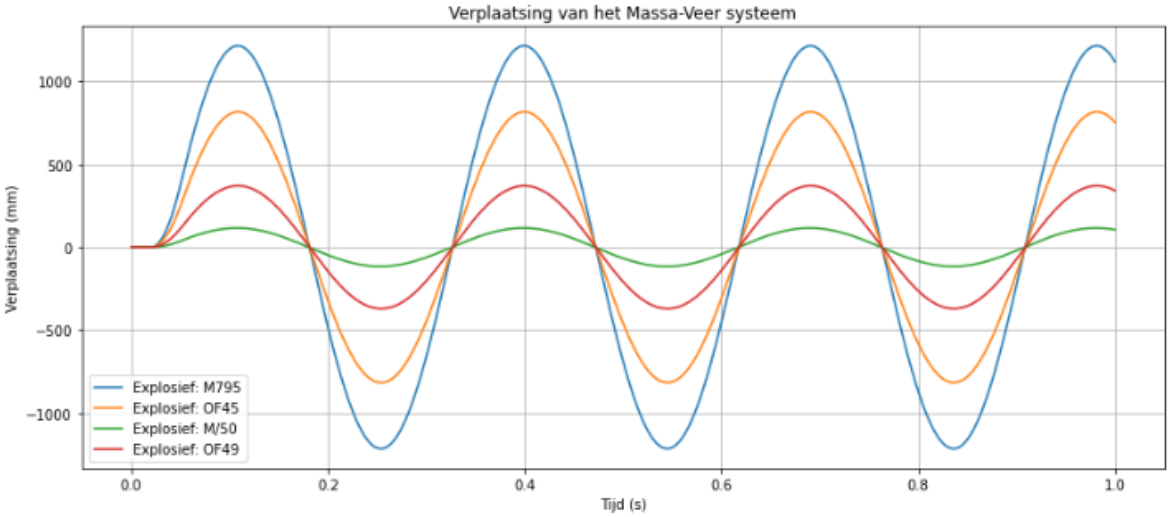
```
def kracht(t, Explosie_kracht):
    if ta <= t <= ta + Belastingstijd:
        return Explosie_kracht
    else:
        return 0.0

def mass_spring_system(t, y, Explosie_kracht):
    x, v = y                                # y[0] verplaatsing, y[1] snelheid
    f_s = -k * x                            # Veer kracht
    f_explosie = kracht(t, Explosie_kracht)   # Explosie belasting [N]
    a = (f_explosie + f_s) / m              # Versnelling
    return [v, a]

initial_conditions = [0.0, 0.0]
t_eval = np.linspace(0, tt, 1000)

plt.figure(figsize=(12, 16))

for i, force in enumerate(Fved):
    # Systeem oplossen met solve_ivp die gebruik maakt van RK45
    solution = solve_ivp(mass_spring_system, [0, tt], initial_conditions, t_eval=t_eval, args=(force,))

    tijd = solution.t
    verplaatsing = solution.y[0]   #[m]
    snelheid = solution.y[1]
    veer_kracht = -k * verplaatsing  #[N]
    applied_force = np.array([kracht(t, force) for t in tijd])

    plt.subplot(3, 1, 1)
    plt.plot(tijd, applied_force/1000, label=f"Explosief: {nm[i]}")
```

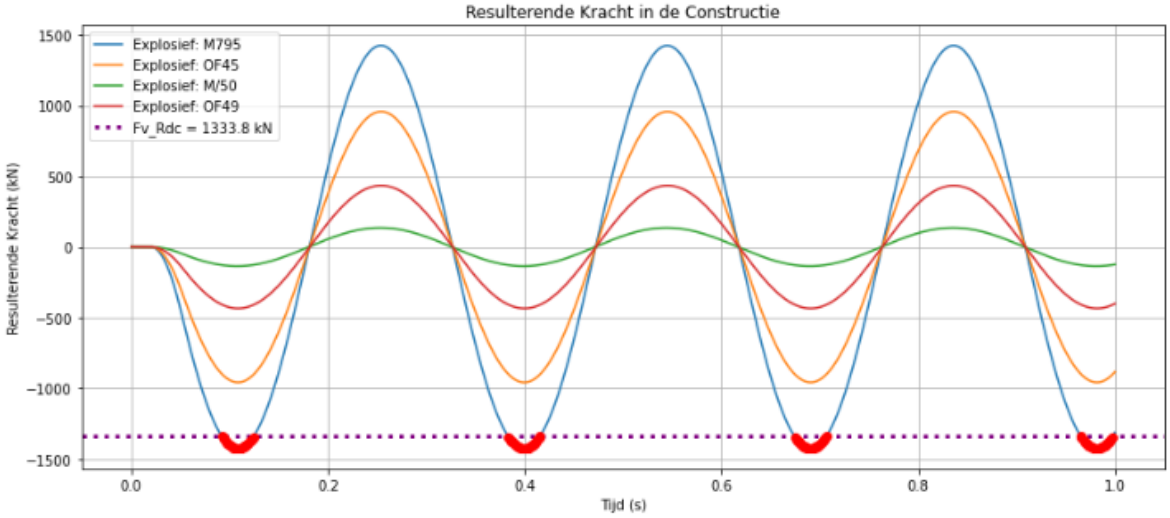
```
    plt.subplot(3, 1, 2)
    plt.plot(tijd, verplaatsing*1000, label=f"Explosief: {nm[i]}")

    plt.subplot(3, 1, 3)
    plt.plot(tijd, veer_kracht/1000, label=f"Explosief: {nm[i]}")
    exceeds = veer_kracht/1000 < -1*Fvrdc[i]
    plt.scatter(tijd[exceeds], veer_kracht[exceeds]/1000, color='red', zorder=5)


plt.subplot(3, 1, 1)
plt.xlabel("Tijd (s)")
plt.ylabel("Kracht (kN)")
plt.title("Aangebrachte kracht op systeem")
plt.legend()
plt.grid()

plt.subplot(3, 1, 2)
plt.xlabel("Tijd (s)")
plt.ylabel("Verplaatsing (mm)")
plt.title("Verplaatsing van het Massa-Veer systeem")
plt.legend()
plt.grid()

plt.subplot(3, 1, 3)
plt.xlabel("Tijd (s)")
plt.ylabel("Resulterende Kracht (kN)")
plt.title("Resulterende Kracht in de Constructie")
plt.axhline(y=-1*Fvrdc[i], color="purple", linestyle=":", label=f"Fv_Rdc = {Fvrdc[i]:.1f} kN", linewidth=3)
plt.legend()
plt.grid()

plt.tight_layout()
plt.show()
```

```
toetsing3 = []
for i, force in enumerate(Fved):
    solution = solve_ivp(mass_spring_system, [0, tt], initial_conditions, t_eval=t_eval, args=(force,))

    verplaatsing = solution.y[0]
    veer_kracht = -k * verplaatsing  # Veer kracht

    max_veer_kracht = np.max(np.abs(veer_kracht)) / 1000  # [kN]

    if max_veer_kracht <= Fvrdc[i]:
        toetsing3.append(f"Explosie {i+1}: Toelaatbaar:      Fv_Ed = {max_veer_kracht:.2f} N   ≤   Fv_Rdc = {Fvrdc[i]:.2f} N")
    else:
        toetsing3.append(f"Explosie {i+1}: Niet toelaatbaar: Fv_Ed = {max_veer_kracht:.2f} N   >   Fv_Rdc = {Fvrdc[i]:.2f} N")

# Print each result once
for result in toetsing3:
    print(result)
```

```
Explosie 1: Niet toelaatbaar: Fv_Ed = 1423.86 N   >   Fv_Rdc = 1333.77 N
Explosie 2: Toelaatbaar:      Fv_Ed = 956.93 N   ≤   Fv_Rdc = 1333.77 N
Explosie 3: Toelaatbaar:      Fv_Ed = 135.48 N   ≤   Fv_Rdc = 1333.77 N
Explosie 4: Toelaatbaar:      Fv_Ed = 434.14 N   ≤   Fv_Rdc = 1333.77 N
```




Verplaatsing van het Massa-Veer systeem
Verplaatsing (mm)
Tijd (s)
Explosief: M795
Explosief: OF45
Explosief: M/50
Explosief: OF49


Resulterende Kracht in de Constructie
Resulterende Kracht (kN)
Tijd (s)
Explosief: M795
Explosief: OF45
Explosief: M/50
Explosief: OF49
Fv_Rdc = 1333.8 kN

Bijlage B. Turnit-In

https://ev.turnitin.com/app/carta/en_us/?u=1172587444&s=1&lang=en_us&o=2508285067&ro=103&student_user=1

turnitin

Digital Receipt

This receipt acknowledges that Turnitin received your paper. Below you will find the receipt information regarding your submission.

The first page of your submissions is displayed below.

Submission author:	Ruben Rietveld
Assignment title:	FINAL Turnit-In BSc Thesis submission assignment
Submission title:	Eindrapport_Rietveld.pdf
File name:	Eindrapport_Rietveld.pdf
File size:	1.74M
Page count:	43
Word count:	9,132
Character count:	54,637
Submission date:	04-Nov-2024 07:25PM (UTC+0100)
Submission ID:	2508285067


Kan de kelder van het Civiele Techniek gebouw dienen als schuilkelder?