

Notitie

www.tno.nl

@tno.nl

Aan Rijksvastgoedbedrijf
t.a.v. [REDACTED]

Datum
31 juli 2024

Van [REDACTED]

Onderwerp Beoordeling trillingsniveaus in woningen nabij het
ASK voor kans op schade en hinder

Beoordeling trillingsniveaus in woningen nabij het ASK voor de kans op schade en hinder

Inhoudsopgave

1 Inleiding	2
2 Beoordeling trillingsniveaus voor kans op gebouwschade	2
3 Trillingen in relatie tot hinder	5
4 Bestaande situatie	8
5 Conclusie	9
6 Vervolg	10
Referenties	10
Bijlage 1: Dominante pad voor trillingen in relatie tot schade	11
Bijlage 2: Beoordeling trillingsschade op basis van geluiddruk voor gebouwen rond het ASK	22
Bijlage 3: Overzicht van wapens en bronlocaties voor trillingen	25
Bijlage 4: Dominante pad voor trillingen in relatie tot hinder	27
Bijlage 5: Verband tussen geluidexpositieniveau en trillingssnelheid van vloeren	45
Bijlage 6: Voorstel beoordelingsrichtlijn voor herhaald voorkomende schok	61

1. Inleiding

In 2016 heeft TNO onderzoek [1] uitgevoerd naar trillingen die optreden bij woningen rond het Artillerie Schietkamp (ASK) als gevolg van het gebruik van explosieven en de detonaties van projectielen op dit schietterrein. De resultaten van dit onderzoek zijn gebruikt voor de aanvraag van een revisievergunning voor het ASK in 2023. De Inspectie Leefomgeving en Transport (ILT) heeft in de ontwerp-beschikking van 19 maart 2024 aangegeven dat onvoldoende duidelijk is gemaakt welke effecten er in de omgeving door trillingen kunnen optreden.

Naar aanleiding van de punten die in de ontwerp-beschikking aan de orde zijn gesteld hebben het Rijksvastgoedbedrijf (RVB), ILT en TNO in een bespreking op 27 mei 2024 afspraken gemaakt over het leveren van aanvullende informatie, wat heeft geleid tot een plan van aanpak [2]. Voor wat betreft het trillingsonderzoek gaat het over de volgende onderwerpen, die in voorliggende notitie in bredere context aan de orde komen:

- Zowel in relatie tot de kans op schade aan gebouwen als hinder voor omwonenden moet aan de hand van eerder uitgevoerd onderzoek worden toegelicht dat het overdrachtspad voor trillingen door de lucht gaat, via de drukgolf, en dat de trillingsoverdracht via de bodem hierbij van ondergeschikt belang is. (Zie paragrafen 2.1 en 3.1 en bijlagen 1 en 4.)
- Vanwege het bepalende overdrachtspad door de lucht is het verband afgeleid tussen de sterkte van de drukgolf (het berekende geluidexpositieniveau van een mondingsknaal of detonatie) bij de woning en de sterkte van de trillingssnelheid ($v_{eff,max}$) van de woning. Daarbij moet duidelijk worden gemaakt hoe de geluidexpositieniveaus zijn berekend. (Zie paragrafen 2.3 en 3.3 en bijlage 5.)
- De gekozen grenswaarden voor de trillingssnelheid voor het beschermen van omwonenden tegen trillinghinder moeten worden onderbouwd. (Zie paragraaf 3.2.)
- Er moet duidelijk worden gemaakt dat de woningen die zijn betrokken in het trillingsonderzoek in 2016 representatief zijn voor de woningen rond het ASK en dat de resultaten van het onderzoek uit 2016 acht jaar later nog gebruikt kunnen worden voor een vergunningaanvraag. (Zie bijlage 2.)
- Een overzicht is nodig waaruit blijkt welke activiteiten relevant zijn voor trillinghinder, hoe vaak die optreden en in welke mate. (Zie bijlage 3.)
- Er moet inzichtelijk worden gemaakt wat de veranderingen zijn ten opzichte van de huidige vergunde situatie, die invloed kunnen hebben op veranderingen in de hinder door trillingen. (Zie hoofdstuk 4.) Defensie acht het meenemen van de vigerende vergunningen vanwege ‘bestaande rechten’ van belang, voor zover ILT voornemens zou zijn activiteiten te beperken.

In de notitie wordt onderscheid gemaakt tussen trillingen in relatie tot de kans op schade (hoofdstuk 2) en de kans op hinder (hoofdstuk 3). Hoewel risico op schade geen deel uitmaakt van het beoordelingskader van de vergunningaanvraag, hebben het RVB en Defensie TNO gevraagd om hier aandacht aan te besteden.

2. Beoordeling trillingsniveaus voor kans op gebouwschade

2.1 Onderzoeksmethode

Het trillingsonderzoek dat in 2016 bij woningen rond het ASK is uitgevoerd [1] is gebaseerd op metingen in een viertal woningen en beoordeling van de kans op schade aan de hand van de SBR-trillingsrichtlijn A [3]. Deze richtlijn geeft grenswaarden voor trillingen die zijn gebaseerd op het uitgangspunt dat de kans op het ontstaan van schade kleiner moet zijn dan 1%.

Hoewel de SBR-richtlijn A uitgaat van metingen, heeft TNO gebruik gemaakt van een eerder ontwikkelde methode op basis van berekeningen om de gevolgen van trillingen door het gebruik van zware wapens op het ISK voor schade aan gebouwen inzichtelijk te maken. Hiermee wordt de kans op schade aan een woning door een schot of een explosie beoordeeld op basis van de geluiddruk voor de gevel.

Een voorspellingsmethode op basis van berekeningen is noodzakelijk, omdat het uitvoeren van trillingsmetingen op de gevels van alle woningen in het kader van een vergunningaanvraag praktisch gezien onmogelijk is, zeker wanneer het gaat om een groot gebied met duizenden woningen rond een uitgestrekt bedrijfsterrein met veel verschillende geluidbronnen en bronlocaties. Omdat dit probleem al eerder werd onderkend bij het bepalen van het risico op schade aan woningen op Texel ten gevolge van explosies op De Vliehors, heeft TNO in 2017 een rekenmethode ontwikkeld.

Deze methode is uitvoerig beschreven in rapport TNO 2017 R10606 [4] (bijlage M11 bij de vergunningaanvraag). Het rapport TNO 2017 R11677 [5] (bijlage M14) voorziet in de behoefte aan een samenvatting van de onderbouwing van de methode.

Voorwaarde voor toepassing van de methode is het uitgangspunt dat trillingen van de gevels van woningen ontstaan via laagfrequente drukgolven door de lucht, en dat de trillingsoverdracht door de bodem hieraan ondergeschikt is. Op verzoek van ILT heeft TNO aan de onderbouwing hiervan voor de situatie rond het ASK meer aandacht besteed. Informatie hierover is opgenomen in bijlage 1 van deze notitie.

2.2 Toetswaarde

De methode die TNO heeft ontwikkeld gaat uit van een relatie tussen de energie van het op de gevel van een woning invallende geluid (het geluidexpositieniveau) en de trillingssnelheid van het gevelvlak die daar het gevolg van is. Met dit model is voor een groot aantal typen gevels berekend bij welke geluidniveaus schade kan ontstaan. De toetswaarde voor het geluidniveau is zodanig gekozen dat de kans op schade kleiner is dan 1% (net als bij de SBR-richtlijn A), waarbij een schadegevoelige woninggevel¹ als uitgangspunt is genomen. Dit resulteerde in een toetswaarde van 110 dB voor het ongewogen geluidexpositieniveau (L_A) in het frequentiegebied tussen 1 en 100 Hz. Voor de situatie rond het ASK is de toetswaarde verlaagd naar 105 dB. De reden hiervoor is dat er vanwege het uitgestrekte gebied rond het ASK niet op korte termijn onderzocht kon worden of er gebouwen rond het ASK aanwezig zijn met een verhoogd risico op schade, zoals panden met een monumentenstatus of met metselwerk dat in slechte staat verkeert (zoals bedoeld in SBR-richtlijn A). Bijlage 2 gaat hier verder op in.

De verlaging van de toetswaarde van 110 naar 105 dB zou voor Defensie de noodzaak met zich mee brengen om maatregelen te nemen die ervoor zorgen dat de hoogste geluidniveaus van detonaties verminderen. Dit betekent dat explosies van TNT met ladingen van meer dan 1 kg op bronlocaties die niet zijn afgeschermd niet mogelijk zijn, tenzij de explosieven worden ingegraven. De diepte voor het ingraven is 1 meter voor ladingen die niet groter zijn dan 5 kg en 2 meter voor grotere ladingen. Deze maatregelen hebben nauwelijks invloed op de geluidbelasting $B_{s,dan}$ door schietgeluid, omdat het per jaar om een gering aantal explosies gaat, in vergelijking met bijvoorbeeld de detonaties van granaten die plaatsvinden in de doelengebieden. Maar om de hoogste niveaus van afzonderlijke knallen te beperken en daarmee de sterkste trillingen te verminderen zijn de maatregelen nodig. Defensie hecht eraan om nog wel de uitwerking van explosieven op bijvoorbeeld voertuigen te kunnen testen, waarbij ingraven niet mogelijk is, maar beperkt zich daarbij tot alleen de afgeschermd locatie van springput 1 (een 5 meter diepe kuil, omgeven door een 3 meter hoge aarden wal).

2.3 Bepaling van geluidexpositieniveaus

Voor het berekenen van de geluidexpositieniveaus van mondingsknallen of detonaties, die getoetst kunnen worden aan bovengenoemde waarde van 105 dB, is een methode toegepast die zoveel mogelijk aansluit bij de wettelijke methode voor het berekenen van de geluidbelasting $B_{s,dan}$ door schietgeluid. Maar er zijn ook verschillen. Een belangrijk verschil is dat het risico op schade gebaseerd is op het geluid in het frequentiegebied van 1 tot 100 Hz, terwijl voor de geluidbelasting het frequentiegebied tussen 12 Hz en 5.000 Hz ligt.

Ook van belang is dat voor het risico op schade is uitgegaan van een situatie met ongunstige weersomstandigheden voor de geluidoverdracht (waarbij de hoogste geluidniveaus optreden), in plaats van een gemiddelde over verschillende weerssituaties bij $B_{s,dan}$.

¹ Een halfsteens muur met een oppervlak van 120 m².

Samengevat is het geluidexpositieniveau van één schot of detonatie bij gebruik van een bepaald wapen berekend uit:

- a) de geluidemissie van het wapen, die is overgenomen uit het bestand met emissiegegevens dat onderdeel is van de wettelijke rekenmethode voor schietgeluid in het frequentiegebied van 12 Hz t/m 5 kHz;
- b) extrapolatie van de geluidemissie naar lagere frequentiebanden, waarbij een verzwakking van 3 dB per tertsbands is aangehouden bij extrapolatie van 16 Hz naar 1 Hz (op basis van ISO 17201-2:2016);
- c) bepaling van de geluidoverdracht van bronlocatie naar beoordelingspunt, bij een geluidsnelheidsprofiel dat overeenkomt met een meewind-situatie (profiel 15 uit de database van de geluidsnelheidsprofielen horende bij de wettelijke rekenmethode voor schietgeluid), uitgaande van een bosbodem (geluid-absorberend);
- d) combinatie van de resultaten van b en c, gecombineerd met de afstandsverzwakking en luchtdemping op basis van de afstand tussen bronlocatie en beoordelingspunt, in tertsbanden (waarbij voor de drie tertsbanden binnen een octaafband dezelfde geluidoverdracht is aangehouden);
- e) bepaling van het breedbandige expositieniveau in het beoordelingspunt over de tertsbanden met middenfrequenties van 1 Hz t/m 100 Hz.

De invloed van afscherming op de geluidoverdracht (stap c) is alleen (indicatief) bepaald voor de springput van ongeveer 5 meter diep (t.o.v. maaiveld), waar een aarden wal van 3 meter hoog omheen ligt. Hier is de afscherming bij 16 Hz geëxtrapoleerd naar lagere frequenties volgens de rekenmethode van Maekawa, waarbij het effect van afscherming terugloopt van 5 naar 1 dB. Afgezien hiervan zijn obstakels bij het berekenen van de geluidoverdracht buiten beschouwing gelaten.

Het resultaat van de bovenstaande stappen is weergegeven in bijlage 3. Voor 10 beoordelingspunten rond het ASK, waar de sterkste drukgolven van afzonderlijke mondingsknallen of explosies worden verwacht, zijn in tabellen in bijlage 3 per beoordelingspunt de geluidexpositieniveaus weergegeven voor de belangrijkste combinaties van wapengebruik en bronlocaties. Hieruit volgen deze conclusies:

1. Voor de meeste combinaties van wapengebruik en bronlocatie is het geluidexpositieniveau in de beoordelingspunten lager dan 100 dB.
2. Van een aantal wapens ligt het geluidexpositieniveau tussen 100 en 105 dB. Dit zijn de detonaties van granaten met kaliber 120 en 155 mm (mortier en Panzerhouwitser) in het grote en kleine doelengebied, de mondingsknal van de Panzerhouwitser met lading 8 op de Hojelbaan en detonaties van ladingen TNT van meer dan 1 kg t/m 5 kg in de springput (waarbij de ladingen niet zijn ingegraven).
3. Detonaties van ladingen TNT van meer dan 5 kg in de springput en van 2 kg lading bij de trainingswand leiden bij enkele beoordelingspunten aan de zuidoostkant van het ASK tot een overschrijding van de toetswaarde van 105 dB, met maximaal 7 dB. Het betreft woningen met adressen Woldbergweg 4, Stenenkomweg 7 en Elburgerweg 27 in Epe. De niveaus zijn het hoogst bij de twee eerst genoemde adressen, die Defensie in eigendom heeft en er één ten behoeve van anti-kraak heeft verhuurd. Als deze buiten beschouwing worden gelaten, is het geluidexpositieniveau lager dan 110 dB.
4. Als de adressen Woldbergweg 4 en Stenenkomweg 7 als woningen behouden blijven, is het gebruik van niet ingegraven explosieven TNT met ladingen van meer dan 5 kg in de springput en 2 kg lading op de trainingswand niet mogelijk. Als de woningen een andere bestemming krijgen, moet worden nagegaan of een geluidexpositieniveau bij andere woningen aan de zuidoostkant van het ASK tot maximaal 110 dB toelaatbaar is op basis van de constructie en de staat van de woningen. (Een hoger niveau dan 105 dB of zelfs 110 dB betekent niet altijd dat er sprake zal zijn van trillingsniveaus die de grenswaarden uit de SBR-richtlijn A overschrijden, maar geeft aan dat er een risico is op overschrijding.)
5. Zonder de onder 4 genoemde explosieven blijven de berekende geluidexpositieniveaus in de beoordelingspunten bij woningen beneden de toetswaarde van 105 dB.

In geval van winterse omstandigheden met temperaturen onder het vriespunt of een bodem die na een vorstperiode nog bevroren is, is de aanbeveling om geen activiteiten op het ASK uit te voeren waarbij het geluidexpositieniveau van 100 dB volgens de tabellen in bijlage 3 wordt overschreden.

3. Trillingen in relatie tot hinder

3.1 Overdrachtspad

Net als bij trillingen van gevels in relatie tot het risico op schade, ontstaan ook trillingen op vloeren van woningen, die bewoners als hinderlijk ervaren, door drukgolven door de lucht en is het overdrachtspad via de bodem en de fundering van de woningen van ondergeschikt belang. Voor de aanstoting van vloeren is aan dit punt apart aandacht besteed in bijlage 4.

3.2 Beoordeling van trillingen

Het beoordelingskader voor het verlenen van de aangevraagde omgevingsvergunning wordt gevormd door artikel 2.14 van de Wet algemene bepalingen omgevingsrecht (Wabo). Artikel 2.14 lid 3 van de Wabo bepaalt dat een aanvraag in het belang van de bescherming van het milieu kan worden geweigerd.

Voor de beoordeling van de meeste milieueffecten bestaan concrete wettelijke normen of is beleid geformuleerd. Hiermee wordt het 'belang van de bescherming van het milieu' nader ingekleurd. Voor de beoordeling van trillinghinder bij vergunningverlening zijn geen wettelijke normen vastgesteld. Bij de beoordeling daarvan heeft het bevoegd gezag beoordelingsruimte². Wel bestaan er voor vergunningplichtige inrichtingen hulpmiddelen zonder wettelijke status voor het beoordelen van trillinghinder. De meest gebruikte hulpmiddelen zijn de SBR-richtlijn B [6] en de *Handreiking industrielawaai en vergunningverlening 1998* [7]. Deze hulpmiddelen kunnen en hoeven niet persé als uitgangspunt te worden gebruikt bij het beoordelen van trillinghinder³.

Beide genoemde hulpmiddelen gaan uit van grenzen aan het maximale trillingsniveau $V_{eff,max}$ en het gemiddelde niveau over een etmaalperiode (dag, avond en nacht) V_{per} . Voor $V_{eff,max}$ is er een eerste grenswaarde A1 en een tweede grenswaarde A2. Ligt $V_{eff,max}$ beneden A1, dan wordt de situatie als acceptabel beschouwd. Als $V_{eff,max}$ hoger is dan A1 en lager dan A2, dan wordt V_{per} beoordeeld. Hoewel het principe van de beoordeling aan de hand van $V_{eff,max}$ en V_{per} in SBR-B en de handreiking [7] hetzelfde is, worden verschillende grenswaarden gehanteerd.

De meest gebruikte richtlijn voor het beoordelen van trillingen in relatie tot hinder is SBR-B. In deze richtlijn hangen de grenswaarden af van het soort trilling. Hiervoor geeft SBR-B vier categorieën:

1. continu voorkomend gedurende langere tijd (zoals bij machines, maar niet door weg- en railverkeer);
2. herhaald voorkomend gedurende langere tijd door weg- en railverkeer;
3. continu of herhaald voorkomend gedurende een aaneengesloten periode korter dan drie maanden, door bouw- en sloopwerkzaamheden of
4. incidenteel voorkomende, kortdurende trillingen door bijvoorbeeld explosies.

Onder 'kortdurend' in categorie 4 verstaat de SBR-B een trilling die korter dan enkele seconden duurt, veroorzaakt wordt door stootvormige excitatie en een uitdempend karakter heeft. Het type gebeurtenissen dat hier wordt bedoeld sluit het beste aan bij wat er plaatsvindt op het ASK, maar bij 'incidenteel voorkomend' zijn vraagtekens te plaatsen. Bovendien wordt de grenswaarde A2 voor categorie 4 van 8 (zonder grens aan V_{per}) voor de dagperiode door experts als erg hoog gezien wanneer gebeurtenissen die een dergelijke trillingssterkte veroorzaken meerdere keren per dag voorkomen.

Experts lijken het erover eens te zijn dat er geen passende richtlijnen bestaan voor hinder door trillingen als gevolg van de activiteiten die plaatsvinden op het ASK, maar ook dat een grens aan de trillingssterkte als gevolg van een afzonderlijke mondingsknaal of detonatie wenselijk is. Daarnaast is het de vraag of er ook een grens moet worden gesteld aan de totale blootstelling aan trillingen door alle activiteiten die plaatsvinden gedurende een periode van een dag (of een jaar).

² ABRvS 12 december 2007, ECLI:NL:RVS:2007:BB9936, ro. 2.33; en ABRvS 5 juni 2013, ECLI:NL:RVS:2013:CA2095, ro. 4.

³ Rb. Gelderland 14 juli 2016, ECLI:NL:RBGEL:2016:3854, ro. 5.3.

Een argument om dat niet te doen is dat er al een grens wordt gesteld aan de totale geluidbelasting $B_{s,dan}$ door schietgeluid van alle activiteiten gedurende een jaar en dat hinder door trillingen rond het ASK door (laagfrequent) geluid wordt veroorzaakt. Bij het bepalen van de grenswaarden voor $B_{s,dan}$ op basis van onderzoek met enquêtes (waarin bewoners naar de ervaren hinder van schietgeluid is gevraagd), is dus in bepaalde mate impliciet al rekening gehouden met de hinder door trillingen. Ook is er naar aanleiding van het hinderonderzoek in $B_{s,dan}$ een toeslag verwerkt voor laagfrequent geluid, om er rekening mee te houden dat dit als extra hinderlijk wordt ervaren.

TNO heeft over de beoordeling van trillingen als gevolg van wapengebruik extern advies gevraagd bij Level Acoustics & Vibration (LAV). LAV is gekozen omdat dit bedrijf nauw betrokken is bij het bepalen en beoordelen van trillingen van spoorwegen en hiermee al enige jaren ervaring heeft opgedaan. De opdracht van TNO heeft LAV ruim opgevat, wat heeft geresulteerd in een voorstel voor een richtlijn voor de beoordeling van de blootstelling van mensen aan trillingen 'met een schokachtig karakter', waarbij de schok herhaald voorkomt. De schok is de trilling van een vloer, die dermate kort is dat er geen resonantie in de vloer optreedt. Het voorstel met onderbouwing is opgenomen in bijlage 6.

LAV beargumenteert in bijlage 6 dat er voor schokachtige trillingen bezwaren zijn tegen het toepassen van de grenswaarde v_{per} . In plaats daarvan hanteert de voorgestelde richtlijn een streef- en grenswaarde A2 die afhankelijk is van het totale aantal schokken N in de dag- en avondperiode samen met $v_{eff,max} > A1$. De streefwaarde A2 voor woningen in bestaande situaties voor de dag- en avondperiode is $2,4 / \sqrt{(N \cdot 0,15)}$ en de grenswaarde in de dagperiode is $4,8 / \sqrt{(N \cdot 0,15)}$. A1 is in beide gevallen gelijk aan 0,2. Voor de avondperiode heeft LAV alleen een streefwaarde en geen grenswaarde gegeven.

3.3 Methode voor het bepalen van trillingssnelheid van vloeren in woningen

In paragraaf 2.1 is aangegeven dat het uitvoeren van trillingsmetingen op de gevels van gebouwen voor het bepalen van de kans op schade voor een situatie als bij het ASK in het kader van een vergunningaanvraag praktisch gezien onmogelijk is. Voor trillingen in relatie tot hinder, waarvoor metingen in woningen nodig zouden zijn, geldt dit in nog sterkere mate. Metingen in woningen zijn bewerkelijker omdat enige tijd tevoren afspraken gemaakt moeten worden met bewoners, die bereid moeten zijn om onderzoekers toe te laten in hun woning, ook op plaatsen waar normaal geen bezoekers worden ontvangen. En daarbij is de kans aanwezig dat de afspraak kort te voren moet worden afgezegd wanneer blijkt dat de weersomstandigheden een representatieve meting in de weg staan. Kortom, ook voor het beoordelen van trillingen in relatie tot hinder is het nodig om een rekenmethode te gebruiken.

Omdat ook voor trillingen van vloeren de aanstoting via de lucht gaat (zie bijlage 4), is onderzocht wat het verband is tussen het geluidexpositieniveau van een mondingsknal of explosie buiten de gevel van een woning en de trillingssnelheid van de vloer van een woning. Dat verband is voor iedere woning anders en is vooral afhankelijk van het type vloer. Een houten vloer trilt bij dezelfde aanstoting sterker dan een betonnen vloer. De relatie tussen L_x en $v_{eff,max}$ is in bijlage 5 afgeleid voor 10 verschillende vloeren in de vier woningen waar in 2016 metingen zijn uitgevoerd. Twee woningen dateren uit de jaren '50, één woning is gebouwd in 1923 en één in 1870. Van de 10 vloeren is er één van beton (een vloer op de begane grond); de overige zijn houten vloeren. Voor de relatie tussen L_x en $v_{eff,max}$ is de betonnen vloer buiten beschouwing gelaten en is uitgegaan van een houten vloer die 'bovengemiddeld' gevoelig is voor trillingen. De trillingssnelheid $v_{eff,max}$ kan hiermee worden bepaald uit het geluidexpositieniveau, dat wordt berekend op dezelfde manier als is beschreven in paragraaf 2.3. Voor de meeste woningen zal dit leiden tot een overschatting van $v_{eff,max}$, omdat is uitgegaan van een woning waarvan de vloeren bovengemiddeld gevoelig zijn voor trillingen. Op betonnen vloeren zal de trillingssnelheid lager zijn.

3.4 Beoordeling

Het toepassen van de door LAV voorgestelde beoordelingsrichtlijn (bijlage 4) is zeer complex, omdat het aantal mogelijke combinaties van wapengebruik en bronlocaties gedurende een dag op het ASK vrijwel onbeperkt is. Het is onmogelijk om uit alle combinaties de meest kritische te kiezen, die bovendien nog per beoordelingspunt zal verschillen. Daarom is gekozen voor een aanpak waarbij het gemiddelde dagelijkse aantal van de voor trillingen relevante mondingsknallen en detonaties wordt bepaald uit de opgave van Defensie van het jaarlijkse aantal, gedeeld door 365. Hiermee wordt verondersteld dat een gelijke verdeling van het gebruik van het ASK over de dagen van het jaar gemiddeld over een grote groep personen net zo veel hinder oplevert als een ongelijke verdeling, waarbij bijvoorbeeld alle schoten en explosies met de zwaardere wapens in 12 dagen plaatsvinden en het op alle overige dagen rustig is. Dit wordt ook aangenomen bij het beoordelen van de geluidbelasting door schietgeluid (in $B_{s,dan}$) en door alle overige bronnen (in L_{den}).

In bijlage 3 is de methode toegepast. Het overzicht in bijlage 3 is hierboven al besproken in paragraaf 2.3. De bepaling van L_x voor verschillende combinaties van wapens en bronlocaties per beoordelingspunt is hetzelfde, maar nu gaan we een stap verder, door $v_{eff,max}$ te bepalen uit de trillingssnelheid en de grenswaarde A2 te bepalen uit het aantal schokken (N) met $v_{eff,max}$ groter dan A1 (= 0,2).

Uit bijlage 3 zijn de volgende conclusies te trekken:

1. De grenswaarde A2 varieert voor de verschillende beoordelingspunten tussen 1,8 en 2,2. De streefwaarde is de helft hiervan, en varieert dus tussen 0,9 en 1,1.
2. Het grootste deel van de mondingsknallen en explosies blijft onder de streefwaarde. Detonaties van granaten 120 en 155 mm en de mondingsknal van 155 mm met de grootste voortdrijvende lading (lading 8 op de Hojelbaan) leiden tot een $v_{eff,max}$ die hoger is dan de streefwaarde, maar lager is dan de grenswaarde voor de dagperiode. Zowel bij de huidige (vergunde) bedrijfsvoering van het ASK als de situatie van de vergunningaanvraag vinden er in de avondperiode detonaties plaats van granaten van mortieren (120 mm), die leiden tot overschrijding van de streefwaarde voor de avondperiode.
3. Detonaties van ladingen TNT van meer dan 1 kg in de springput en van 2 kg kruislading bij de trainingswand leiden bij enkele beoordelingspunten aan de zuidoostkant van het ASK tot een overschrijding van de grenswaarde. Dit zijn dezelfde schokken die ook zorgen voor een overschrijding van de toetswaarde voor schade aan woningen. Dit is ook al het geval in de huidige (vergunde) situatie. Afhankelijk van het toekomstige gebruik van de woningen aan de zuidoostkant van het ASK (zie paragraaf 2.3 onder punt 4) kan worden nagegaan of de betreffende woningen minder trillingsgevoelig zijn dan waar bij de berekeningen vanuit is gegaan. Daaruit zal blijken of het wenselijk is om maatregelen te treffen.

Bijlage 3 geeft per beoordelingspunt een overzicht van het aantal schokken dat gemiddeld op een dag voorkomt met de daarbij horende waarde $v_{eff,max}$, afhankelijk van het type wapen en de bronlocatie. Daarmee geeft deze bijlage invulling aan het verzoek van ILT om informatie over het in de inleiding als laatste genoemde onderwerp. Hierbij moet worden bedacht dat de niveaus $v_{eff,max}$ minder vaak voorkomen dan in het overzicht is vermeld. Dit komt omdat is uitgegaan van een ongunstige weersituatie (met goede geluid-overdracht), terwijl in de praktijk ook situaties voorkomen waarbij het geluid van een knal op grotere afstand van de bron in de orde van 10 tot 20 dB lager is, waarmee $v_{eff,max}$ de onderste grenswaarde A1 (van 0,2) niet meer overschrijdt en de knal niet meer moet worden meegeteld in het aantal N dat de grenswaarde A2 bepaalt. In de praktijk kan N een factor 2 lager zijn, waarmee de grenswaarde volgens de methode van LAV in de praktijk een factor 1,4 hoger kan zijn. Daartegenover staat dat de trillingssnelheid in bijlage 3 een verwachtingswaarde is op basis van berekeningen en er in de praktijk altijd een spreiding rond de verwachtingswaarde zal zijn.

3.5 Communicatie met omwonenden

Het ASK in de huidige omvang bestaat sinds de jaren '20 in de vorige eeuw en is sinds die tijd in gebruik voor oefeningen met zware wapens. De meeste bewoners rond het ASK zijn al vele jaren bekend met geluid van de knallen die op het ASK worden geproduceerd. Nieuwe bewoners zullen zich tot op zekere hoogte bewust zijn van de invloed van de activiteiten op het ASK op de kwaliteit van hun leefomgeving en dat hebben meegenomen bij in de afwegingen bij de keuze van de toekomstige woonlocatie.

Communicatie met de omgeving over de activiteiten waar omwonenden last van kunnen hebben is van groot belang om hinder te voorkomen. Defensie informeert de omwonenden die zich daarvoor hebben opgegeven wekelijks via een nieuwsbrief per e-mail over de te verwachten activiteiten op het ASK voor de komende week, met een agenda per dag en per dagdeel. Grotere oefeningen met zware wapens worden ook vier weken tevoren gemeld aan gemeenten, zodat die de informatie in plaatselijke kranten kunnen plaatsen. Defensie werkt aan een website waarmee dezelfde informatie toegankelijk wordt gemaakt.

Bij de vier gemeenten die grenzen aan het ASK en de provincie Gelderland heeft TNO informatie gevraagd over klachten over geluid en trillingen. Daaruit kwam naar voren dat bij gemeenten en provincie geen klachten bekend zijn. Een belangrijke reden daarvoor is waarschijnlijk dat Defensie een telefoonnummer heeft voor vragen of het melden van overlast, waar gemeenten naar verwijzen. Defensie registreert meldingen en klachten, maar sinds 2015 niet meer met naam en adres. Alleen de woonplaats wordt nog (zoveel mogelijk) genoteerd. Onduidelijk is of het in alle gevallen ging over overlast, of meer om behoefte aan informatie over de activiteiten die de trillingen veroorzaken.

Over de jaren 2010 t/m 2022 zijn er gemiddeld per jaar 14 meldingen geweest specifiek over trillingen. Het aantal meldingen per jaar varieerde tussen 7 en 21, waarbij er geen duidelijk dalende of stijgende tendens is. Vaak heeft een groot deel van het aantal meldingen in een jaar betrekking op activiteiten op één specifieke dag of enkele dagen. In 2019 hadden bijvoorbeeld 12 van de 21 meldingen te maken met een oefening gedurende drie opeenvolgende dagen. In de periode van 2010 t/m 2022 is één melding bekend van schade aan een woning.

Defensie gaat na een melding na welk wapengebruik de aanleiding kan zijn geweest. Daaruit komen de volgende wapens en bronlocaties naar voren:

- schieten met Panzerhouwtser 155 mm;
- schieten met mortieren 120 mm;
- explosies ('springoefeningen') in de springput en op locatie CPVIIA.

Uit de registratie van Defensie over meldingen van omwonenden blijkt niet dat trillingen voor de omgeving een groot probleem zijn. Maar het is uiteraard niet mogelijk om op basis hiervan te concluderen dat er nauwelijks hinder door trillingen wordt ervaren.

4. Bestaande situatie

4.1 Vergelijking tussen huidige en toekomstige belasting voor de omgeving

In 1989 en 1990 heeft TNO onderzoek gedaan naar het geluid voor de omgeving als gevolg van schietactiviteiten op het ASK en daarop is de vergunning van het ASK uit 1994 gebaseerd. In het onderzoek van 1989 en 1990 is rekening gehouden met diverse combinaties van wapens en munitie, waarvan de Houwtser met kaliber 203 mm het zwaarste wapen is. Dit wapen produceert meer geluid en trillingen dan het zwaarste wapen dat nu en in de toekomst op het ASK wordt gebruikt, de Panzerhouwtser 155 mm.

In 2014 was er behoefte aan nieuwe schietbanen en oefenfaciliteiten, wat heeft geleid tot een zogenoemde milieu-neutrale wijziging van de vergunning (op 10 september 2014). De Houwtser 203 mm werd toen al niet meer gebruikt en is 'ingeruild' voor geluidruimte om de nieuwe schietbanen en oefenfaciliteiten te realiseren. Daarnaast zijn er na 1994 verschillende omgevingsvergunningen voor nieuwe activiteiten verleend.

Voor inzicht in de veranderingen van de effecten van geluid en trillingen voor omwonenden kan de volgende vergelijking worden gemaakt.

- Er zijn volgens de vigerende vergunning in de dag- en avondperiode jaarlijks 10.518, respectievelijk 2.815 schoten mogelijk met de Panzerhouwitser 155 mm, met voortdrijvende ladingen variërend van type 3 t/m 6, waarvan de meeste met type 5. Voor de vergunningaanvraag is uitgegaan van respectievelijk 3.130 en 700 schoten per jaar voor de dag- en avondperiode vooral met ladingen type 4 en 5. In de dagperiode is ook de zwaardere lading type 8 opgenomen in de vergunningaanvraag voor 1.000 van de 3.130 schoten per jaar.
- Hoeveel van de bovengenoemde aantallen binnen de vigerende vergunning met detonerende granaten mag worden geschoten en met welk type detonerende granaat ('high explosive' of oefenmunitie, OSBG) is niet duidelijk. In de vergunningaanvraag gaat het om 280 schoten per jaar met granaten van het type HE ('high explosive'), uitsluitend in de dagperiode.
- Tegenover een lager gebruik van de munitie 155 mm ten opzichte van de vergunde situatie, staat in de vergunningaanvraag een hoger gebruik van mortieren met kaliber 120 mm. Dit aantal zal (volgens de vergunningaanvraag) in de dagperiode toenemen van 3.029 naar 5.420 en in de avondperiode van 287 naar 800. Daarmee neemt het gebruik totale gebruik van 155 mm en 120 mm nog steeds af van 13.547 naar 8.550 in de dagperiode en van 3.138 naar 1.500 in de avondperiode.
- Naast mortieren 120 mm gaat de vergunningaanvraag ook uit van mortieren met kleiner kaliber, 81 en 60 mm. Door het grote aantal (ruim 26.000 per jaar in de dagperiode en 7.700 in de avondperiode) heeft dit een significant aandeel in de geluidbelasting, maar voor trillinghinder zijn deze wapens minder relevant, omdat deze geen trillingen veroorzaken waarbij de waarde A1 wordt overschreden. In de huidige vergunning zijn deze wapens niet genoemd.
- In de huidige vergunning is uitgegaan van het gebruik van niet ingegraven explosieven van totaal 1.015 kg per jaar in de springput. De totale hoeveelheid zou volgens de vergunningaanvraag toenemen naar 1.500 kg. In de huidige vergunning is niet vermeld wat de maximale lading is die in de springput mag worden gebruikt. In de vergunningaanvraag is dat maximaal 18 kg.

5. Conclusie

Op grond van het uitgevoerde onderzoek is er geen reden om te veronderstellen dat het toekomstige gebruik van het ASK, waar de aanvraag voor de revisievergunning vanuit gaat⁴, zal leiden tot meer hinder door trillingen in de omgeving. De trillingsniveaus die ten behoeve van de aanvraag in deze notitie zijn bepaald, geven in vergelijking met de grenswaarden voor trillingen die Level Acoustics & Vibration (LAV) heeft voorgesteld ook niet het beeld dat het wapengebruik dat in de vergunningaanvraag is opgenomen leidt tot een onacceptabel woon- en leefklimaat als gevolg van trillingen, dat niet verenigbaar is met het belang van Defensie.

⁴ Het wapengebruik waar de aanvraag voor de revisievergunning vanuit gaat is opgenomen in de rapportage van het schietgeluidonderzoek voor het ASK [8], dat deel uitmaakt van de aanvraag.

6. Vervolg

Het plan van aanpak [2] voorziet in het meten van trillingsniveaus en geluiddrukken in en bij andere woningen dan de vier waar in 2016 metingen zijn uitgevoerd. Deze metingen kunnen uitgevoerd worden in de komende maanden, of kunnen onderdeel zijn de monitoring van de blootstelling aan milieueffecten en de zorg voor de omgeving. Bij de metingen en de monitoring in de toekomst zal blijken welke variatie in geluidniveaus (waaruit de trillingen voortkomen) optreedt als gevolg van wisselende weersomstandigheden, waaronder ook de omstandigheden die invloed hebben op de geluidabsorptie van de bodem.

Voorlopig wordt voor de korte termijn uitgegaan van metingen in twee tot vier woningen, die worden geselecteerd op basis van ligging ten opzichte van bronlocaties op het ASK, de bouwconstructie en de hinder door trillingen die de bewoners ervaren. Bij de metingen wordt ook de veronderstelde overdracht van trillingen naar de vloeren van woningen (via de drukgolf door de lucht) gevalideerd. Uit de meetresultaten worden relaties bepaald tussen de geluiddruk en de trillingen van de vloeren in de woningen, waarbij onderscheid kan worden gemaakt naar typen woningen, zodat in het vervolg ook rekening gehouden kan worden met woningen die minder gevoelig zijn voor trillinghinder. De combinatie van deze relaties met de optredende geluidexpositieniveaus kan leiden tot actualisatie van de risico's op trillinghinder en eventuele schade aan gebouwen rond het ASK.

Referenties

- [1] Trillingsmetingen bij het Artillerie Schietkamp te Oldebroek: toetsing op hinder en schade van woningen in de omgeving
Rapport TNO 2016 R11226, september 2016
- [2] Plan voor de onderbouwing en validatie van onderzoek naar schietgeluid en trillingen rond het ASK
Notitie TNO 2024 M06059714-03, 14 juni 2024.
- [3] SBR-richtlijn A, schade aan bouwwerken, SBRCURnet Delft, november 2017.
- [4] Het gebruik van geluidmetingen van detonaties op de Vliehors voor de bepaling van de kans op schade aan woningen
Rapport TNO 2017 R10606, 2017.
- [5] Toetsing van mogelijke schade aan gebouwen op Texel door explosies bij oefeningen op de Vliehors
Rapport TNO 2017 R11677, februari 2018.
- [6] SBR-richtlijn B: Meet- en Beoordelingsrichtlijn, deel B, Hinder voor personen in gebouwen, augustus 2013 (978-90-5367-429-1).
- [7] Handreiking industrielawaai en vergunningverlening, ministerie VROM, 1998.
- [8] Schietgeluidbelasting Artillerie Schietkamp ASK, situatie 2014
Rapport TNO 2024 R06059714-01C02, juli 2024.

BIJLAGE 1

Dominante pad voor trillingen in relatie tot schade

Inleiding

Om de gevolgen van trillingen door het gebruik van zware wapens op het ASK voor schade aan gebouwen te bepalen, heeft TNO gebruik gemaakt van een rekenmodel beschreven in rapport TNO 2017 R10606 [1]. Met dit model wordt de kans op schade aan een gebouw door een schot of een explosie beoordeeld op basis van de geluiddruk op de gevel van dat gebouw. Een belangrijk uitgangspunt voor het gebruik van dit model is dat de trillingen in de gevel van het gebouw het gevolg zijn van de geluiddruk op de gevel.

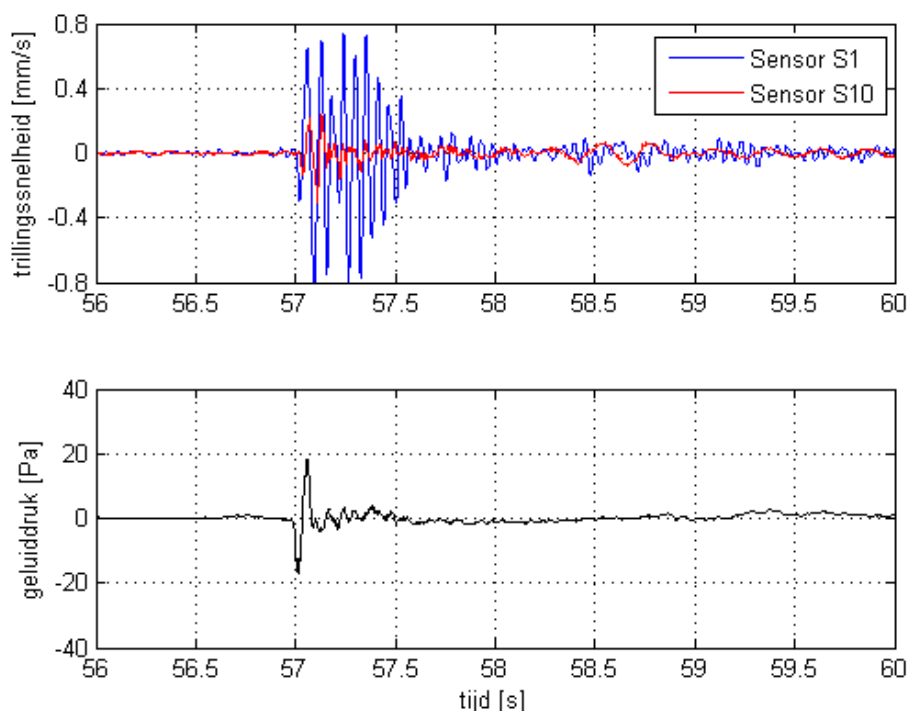
In principe zijn er bij explosies drie transmissiepaden mogelijk:

1. De explosie brengt direct de bodem in trilling. Deze trilling plant zich door de bodem voort, en brengt het gebouw in trilling via de fundering. Dit pad wordt in het vervolg aangeduid met het grondpad.
2. De explosie zorgt voor een drukgolf, die de bodem in trilling brengt terwijl deze zich voortbeweegt door de lucht, waarna het gebouw wordt geëxciteerd door deze bodemtrilling via de fundering. Dit pad noemen we in het vervolg het lucht-grondpad.
3. De explosie zorgt voor een drukgolf die zich door de lucht naar het gebouw voortplant en daar direct de muren van het gebouw in trilling brengt. Dit pad noemen we in het vervolg het luchtpad.

Deze notitie licht toe waarom het uitgangspunt dat alleen het luchtpad van belang is voor beoordeling van de kans op schade, valide is voor het ASK. Hiervoor wordt eerst kort de bewijslast gegeven die uitgebreider is beschreven in rapport TNO 2016 R11226 [2]. Deze bewijslast wordt hierna verder aangevuld met resultaten van aanvullende analyse van de metingen. Vervolgens wordt door middel van verschillende empirische relaties uit wetenschappelijke literatuur een conservatieve inschatting gemaakt van het verwachte trillingsniveau op een bepaalde afstand van de detonatielocatie op basis van het grondpad en het lucht-grondpad.

Bewijslast dominante pad uit trillingsonderzoek ASK in 2016

In rapport TNO 2016 R11226 [2] is in hoofdstuk 4 een onderbouwing gegeven dat de drukgolf door de lucht verantwoordelijk is voor de trillingen in de gevels van de gebouwen. Hiervoor is een vergelijking gemaakt van de gemeten druksignalen bij de woningen en de gemeten trillingssignalen op de gevels van de woningen. De bovenste helft van onderstaande figuur illustreert het trillingssignaal gemeten bij woning 2 voor een sensor op de gevel (sensor S1). Het gelijktijdige signaal van de geluiddruk is direct daaronder weergegeven. Aangezien de trillingen op de gevel gelijktijdig aanvangen met het druksignaal is dit een duidelijke aanwijzing dat de drukgolf door de lucht verantwoordelijk is voor de geveltrillingen. Dezelfde grafieken voor de andere woningen zijn te vinden in bijlage 10.7 van rapport TNO 2016 R11226 [2]. Deze grafieken laten hetzelfde beeld zien.



Signalen gemeten bij woning 2 van de trillingssnelheid (boven) en de geluiddruk (onder).

Aanvullende bewijslast dominante pad

Het resultaat in bovenstaande figuur sluit niet uit dat het grondpad of het lucht-grondpad een bijdrage levert aan de waargenomen geveltrillingen. In het onderzoek in 2016 (TNO 2016 R11226 [2]) zijn geen metingen uitgevoerd in het pad tussen de bron en de gebouwen, waarmee de eventuele bijdrage van deze paden kan worden uitgesloten. In deze paragraaf wordt daarom op basis van een aanvullende analyse van de gebouwmetingen onderbouwd dat het grondpad en het lucht-grondpad geen significante bijdrage leveren aan de geveltrillingen in de onderzochte gebouwen.

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de gemeten V_{top} -waarden aan de fundering en de gevel van woning 1 bij verschillende knallen op het ASK (de nummering van de knallen komt overeen met die in bijlage 10.8 van [2]). Er zijn trillingsniveaus gespecificeerd die zijn gemeten door sensoren in het midden van een gevel op de begane grond (S6), op een stijf punt van de 1^e verdieping (S1 en S2) en in het midden van een gevel op de 1^e verdieping (S4), de locaties van de sensoren zijn weergegeven in onderstaande figuur.

Ten eerste is te zien dat de trillingsniveaus gemeten op de fundering (V1) vaak kleiner dan 0,2 mm/s zijn geweest, wat het gevolg is van het trigger niveau van 0,2 mm/s dat is gehanteerd voor de Vibra sensor. De V_{top} -waarden op de gevel zijn hoger dan de gemeten waarden op de fundering. De sensoren op het stijve hoekpunt van het gebouw op de 1^e verdieping (S1 en S2) geven tot een factor 3,5 hogere waarden dan het niveau gemeten op de fundering (V1). Voor de sensoren in het midden van de gevel op de begane grond (S6) en het midden van de gevel op de 1^e verdieping (S4) worden factoren van minimaal 3 tot 8 gevonden. Afhankelijk van het werkelijk gemeten niveau door sensor V1 kunnen deze factoren nog hoger zijn geweest.

Trillingssnelheden V_{top} gemeten op de fundering en de gevel van woning 1 voor verschillende knallen

Knal	Fundering	Gevel				Verhouding Gevel/Fundering			
	Sensor V1	Sensor S1	Sensor S2	Sensor S4	Sensor S6	S1/V1	S2/V1	S4/V1	S6/V1
2 (18 kg)	$\leq 0,2$	0,3	0,6	0,9	1	$\geq 1,5$	$\geq 3,0$	$\geq 4,5$	$\geq 5,0$
5 (18 kg)	0,21	0,3	0,7	1,4	1,2	1,4	3,3	6,7	5,7
13 (9 kg)	$\leq 0,2$	0,5	0,7	1,6	1,5	$\geq 2,5$	$\geq 3,5$	$\geq 8,0$	$\geq 7,5$
17 (9 kg)	$\leq 0,2$	0,4	0,7	1,7	1,4	$\geq 2,0$	$\geq 3,5$	$\geq 8,5$	$\geq 7,0$
20 (18 kg ing.)	$\leq 0,2$	0,2	0,4	0,6	0,5	$\geq 1,0$	$\geq 2,0$	$\geq 3,0$	$\geq 2,5$



Sensorposities weergegeven op woning 1.

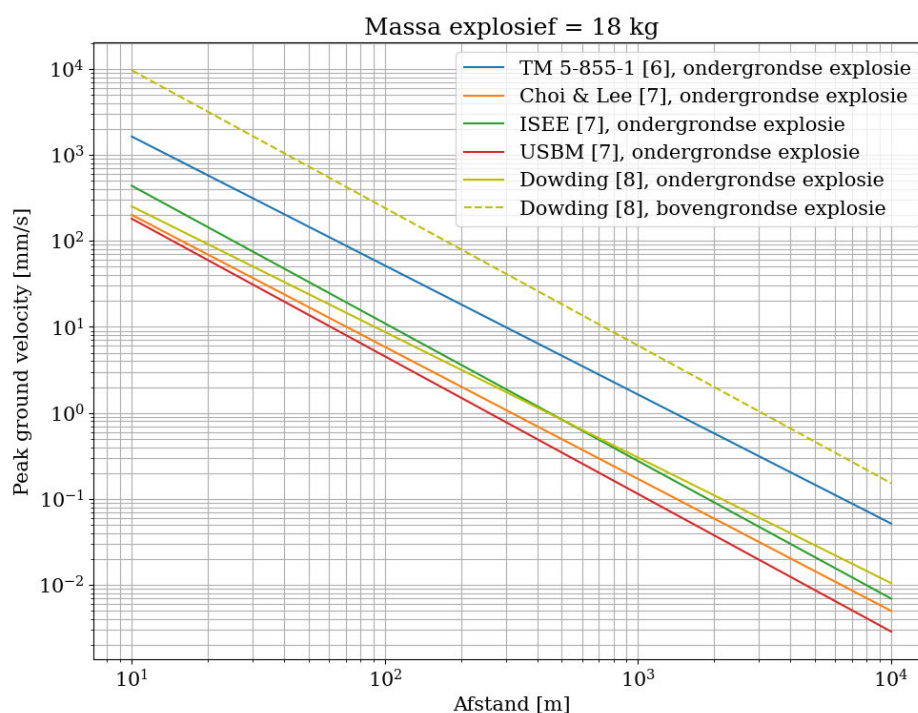
Als de trillingen in de gevel het gevolg zouden zijn van opslingeren van het gebouw door aanstoting van de fundering via de grond (dus via het grondpad of het lucht-grondpad), dan zouden lagere overdrachten van de fundering naar verschillende posities op de gevel worden gevonden. Typische waarden voor de overdracht van fundering naar de wanden van een gebouw voor kortdurende trillingen liggen in de orde van 1 tot 2, zie Staaldin en al. [3] en Gad et al. [4]. Tabel 8.1 van de SBR A stelt dat als de trilling vanuit de bodem via de fundering aangrijpt er indicatief gemeten mag worden. Bij de beoordeling moet dan ten opzichte van een uitgebreide meting een veiligheidsfactor van 1,6 in rekening gebracht worden. In geval van het grondpad/lucht-grondpad is dit van toepassing en kan gesteld worden dat niet verwacht wordt meer dan een factor 1,6 te vinden tussen fundering en gevel trilling, hetgeen in de range ligt van [3] en [4].

In aanvulling 1 aan het eind van deze bijlage zijn de resultaten van de vier onderzochte gebouwen gegeven. Voor alle vier gebouwen worden overdrachtsfactoren gevonden die duidelijk hoger zijn dan volgens bovengenoemde literatuur te verwachten is voor aanstoting van de fundering via de grond. Op basis hiervan wordt geconcludeerd dat het grondpad en het lucht-grondpad niet verantwoordelijk kunnen zijn geweest voor de V_{top} -waarden gemeten op de gevels van de vier gebouwen.

Detonatie-geïnduceerde grondtrillingen met afstand

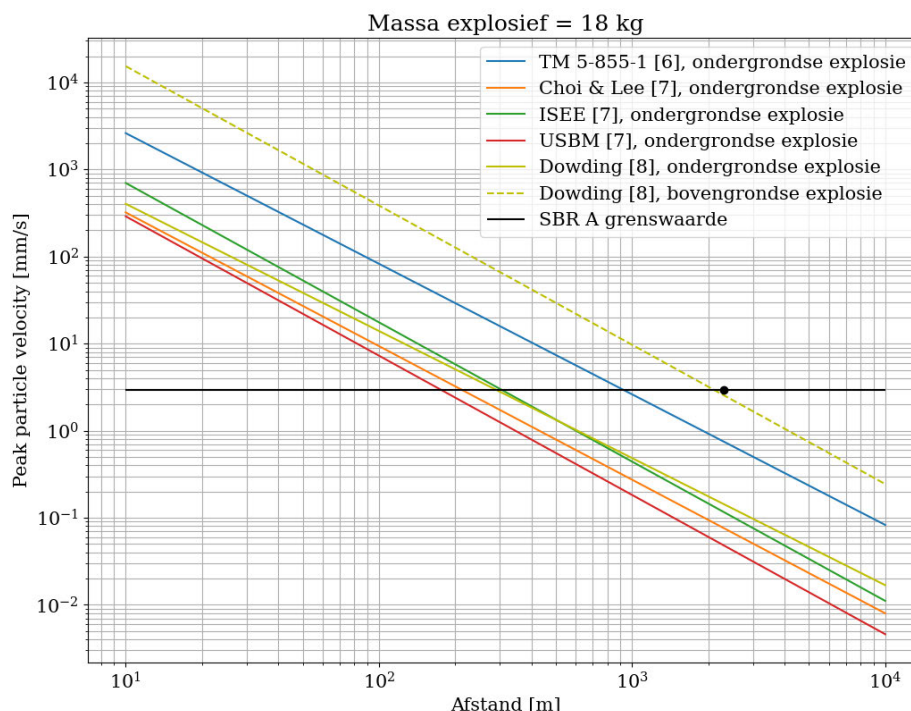
In de vorige paragraaf is bewijslast aangeleverd waaruit blijkt dat voor de 4 onderzochte woningen in TNO 2016 R11226 [2] het luchtpad het dominante pad is, en dat het grondpad en lucht-grondpad geen rol van belang spelen bij de beoordeling van trillingsschade in deze gebouwen. Het is echter mogelijk dat voor gebouwen die zich op kleinere afstand tot het ASK bevinden, de invloed van het grondpad en/of lucht-grondpad wel van belang is. In deze paragraaf worden de verwachte trillingsniveaus behorende bij het grondpad en het lucht-grondpad bepaald op basis van relaties uit de literatuur die de Peak Particle Velocity (PPV, V_{top} in de SBR A) beschrijven als een functie van de afstand tussen de bronlocatie en het gebouw. Deze relaties worden vergeleken met de grenswaarden van de SBR A. Aangetoond wordt dat de meest conservatieve van de beschouwde relaties uit de literatuur trillingsniveaus oplevert die nog onder de meest kritische grenswaarde uit de SBR A liggen op een afstand van 2,3 km. Op basis hiervan kan vastgesteld worden dat het grondpad en lucht-grondpad niet van belang zijn voor beoordeling van de kans op schade.

In aanvulling 2 achteraan deze bijlage is de laagste grenswaarde voor schade volgens SBR A vastgesteld op 2,94 mm/s. In aanvulling 3 zijn verder zes relaties tussen PGV en afstand gegeven voor ondergrondse explosies en één relatie voor bovengrondse explosies. Onderstaande figuur geeft de PGV-waarden verkregen met de zes relaties voor 18 kg TNT, de zwaarste lading.



PGV als functie van afstand voor de verschillende relaties voor ondergronds explosies (grondpad) en bovengrondse explosies (grondpad en lucht-grondpad).

Conservatief wordt aangenomen dat het trillingsniveau op de fundering de PGV-waarde is. V_{top} -waarden uit SBR A (hier PPV op de gevel genoemd) zijn vervolgens bepaald door de PGV te vermenigvuldigen met een partiële veiligheidsfactor $\gamma_v = 1,6$. Zoals besproken in de vorige paragraaf is dit de veiligheidsfactor tussen uitgebreide meting (met sensoren op de gevel) en een indicatieve meting (op één vast punt aan de fundering) waarin de opslingering van fundering naar gevel verdisconteerd zit. Onderstaande figuur toont deze V_{top} (PPV) versus de afstand voor dezelfde zes relaties voor een lading van 18 kg. De SBR A grenswaarde van 2,94 mm/s is gegeven door de horizontale zwarte lijn en de zwarte punt op die lijn markeert een afstand van 2,3 km.



PPV in mm/s als functie van afstand in meter voor de vier verschillende relaties.

De SBR A-grenswaarde is gegeven door de horizontale zwarte lijn. De zwarte punt markeert een afstand van 2,3 km.

Uit de grafiek volgt dat de meest conservatieve relatie, Dowding [8] voor bovengrondse explosies een V_{top} -waarde geeft die op een afstand van 2,3 km nog altijd onder de meest kritische SBR-A grenswaarde ligt. De meest conservatieve relatie voor ondergrondse explosies, TM 5-855-1 [5] ligt hier nog bijna een factor 2 onder. Op basis hiervan kan de conclusie worden getrokken dat het grondpad en lucht-grondpad niet beschouwd hoeven te worden voor trillingsschade, noch voor bovengrondse explosies, noch voor ondergrondse explosies (ingegraven lading).

Tot slot is bepaald hoe realistisch de relatie voor bovengrondse explosies van Dowding [8] is voor het ASK. Hiertoe is een steekproef uitgevoerd voor woning 1. Dowding's relatie geeft een waarde $PGV = 0,9$ mm/s (zie de figuur op de vorige bladzijde). Dit is minstens een factor 4 hoger dan de waarden gemeten aan woning 1. Hieruit volgt dat de relatie van Dowding [8] een zeer conservatieve inschatting geeft van de trillingsniveaus aan de grond ten gevolge van het grondpad/lucht-grondpad voor de ASK situatie.

Conclusie

Een belangrijk uitgangspunt van de gebruikte rekenmethode, voor beoordeling van de kans op schade aan gebouwen rond het ASK, is dat de trillingen in de gevel van het gebouw het gevolg zijn van de geluidsdruk op de gevel (het luchtpad) en dat de overdracht door de grond (via het grondpad of het lucht-grondpad) niet bepalend is.

In deze notitie is op basis van een aanvullende analyse van de metingen uitgevoerd aan 4 gebouwen rond het ASK bewijslast geleverd die dit uitgangspunt onderbouwt. De drie voornaamste conclusies zijn:

- De gemeten signalen op de gevels van alle woningen treden gelijktijdig op met de gemeten geluidsdruksignalen bij die woningen;
- De trillingsniveaus op de gevels van alle woningen zijn veel groter dan de waarden die in literatuur worden gegeven, zou er sprake zijn van een overdracht van de fundering naar de gevel;

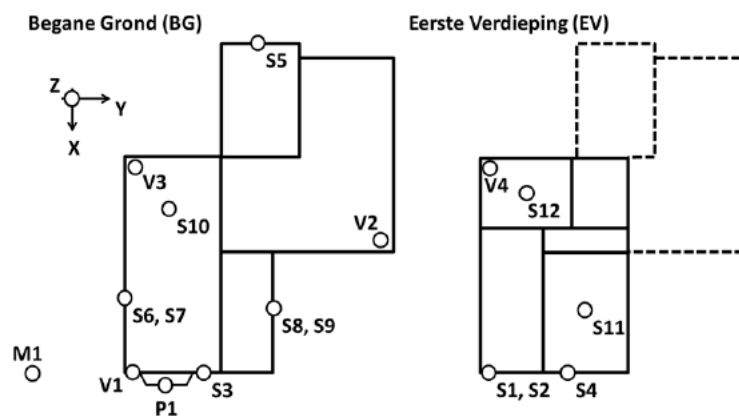
- Conservatieve relaties uit de literatuur voor het grondpad en lucht-grondpad leiden niet tot overschrijding van de meest kritische SBR-A grenswaarde, ook in het geval van extrapolatie van de locaties van de 4 bemeten woningen naar de kortste afstand van 2,3 km tot het ASK.

Op basis van de analyses beschreven in deze notitie concludeert TNO dat, voor de ladinggroottes waarmee schietoefeningen worden gedaan op het ASK, alleen het luchtpad van belang is voor beoordeling van de kans op schade aan gebouwen in de omgeving van het ASK. Het rekenmodel dat TNO heeft ontwikkeld voor het luchtpad is dus van toepassing voor bepaling van de trillingsniveaus in de gevels van gebouwen rond het ASK.

Aanvulling 1: verhouding trillingen fundering en gevel, woningen 1 t/m 4.

Trillingssnelheden V_{top} in mm/s gemeten op de fundering en de gevel van woning 1 voor verschillende knallen.

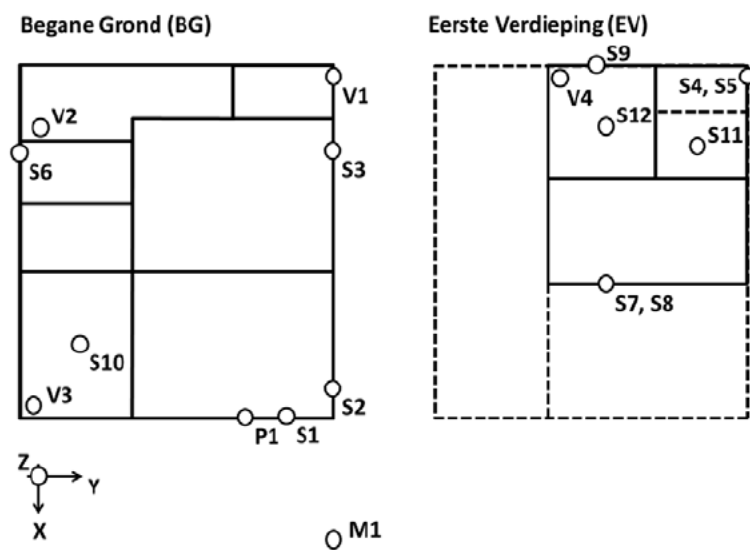
Knal	Fundering	Gevel				Verhouding Gevel/Fundering			
	Sensor V1	Sensor S1	Sensor S2	Sensor S4	Sensor S6	S1/V1	S2/V1	S4/V1	S6/V1
2	$\leq 0,2$	0,3	0,6	0,9	1	$\geq 1,5$	$\geq 3,0$	$\geq 4,5$	$\geq 5,0$
5	0,21	0,3	0,7	1,4	1,2	1,4	3,3	6,7	5,7
13	$\leq 0,2$	0,5	0,7	1,6	1,5	$\geq 2,5$	$\geq 3,5$	$\geq 8,0$	$\geq 7,5$
17	$\leq 0,2$	0,4	0,7	1,7	1,4	$\geq 2,0$	$\geq 3,5$	$\geq 8,5$	$\geq 7,0$
20	$\leq 0,2$	0,2	0,4	0,6	0,5	$\geq 1,0$	$\geq 2,0$	$\geq 3,0$	$\geq 2,5$



Sensorposities weergegeven op plattegrond woning 1.

Trillingssnelheden V_{top} in mm/s gemeten op de fundering en de gevel van woning 2 voor verschillende knallen.

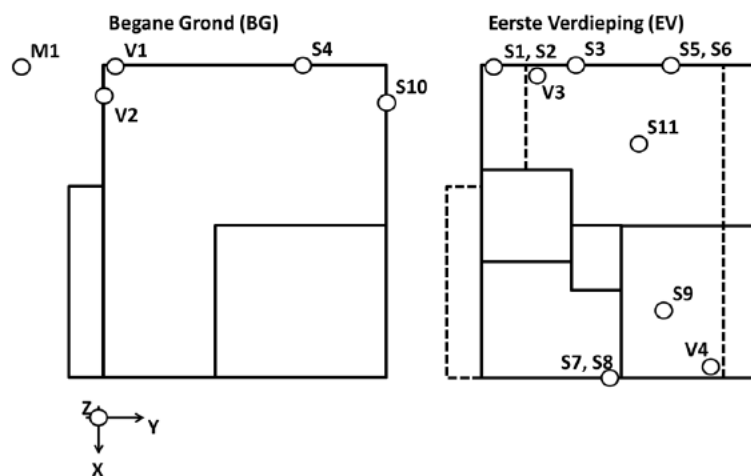
Knal	Fundering	Gevel				Verhouding Gevel/Fundering			
	Sensor V1	Sensor S1	Sensor S2	Sensor S4	Sensor S6	S1/V1	S2/V1	S4/V1	S6/V1
7	0,25	1,4	1,5	0,5	3,9	5,6	6,0	2,0	15,6
8	0,23	1,5	1,9	0,5	3,8	6,5	8,3	2,2	16,5
12	$\leq 0,2$	0,9	1,2	0,3	2,2	$\geq 4,5$	$\geq 6,0$	$\geq 1,5$	$\geq 11,0$
16	$\leq 0,2$	0,7	1,2	0,2	1,7	$\geq 3,5$	$\geq 6,0$	$\geq 1,0$	$\geq 8,5$
20	$\leq 0,2$	1	1,5	0,3	2,3	$\geq 5,0$	$\geq 7,5$	$\geq 1,5$	$\geq 11,5$



Sensorposities weergegeven op plattegrond woning 2.

Trillingssnelheden V_{top} gemeten op de fundering en de gevel van woning 3 voor verschillende knallen.

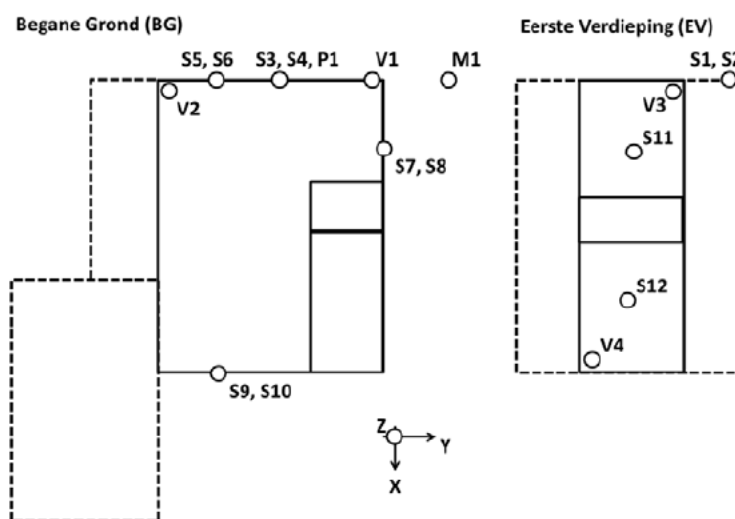
Knal	Fundering	Gevel				Verhouding Gevel/Fundering			
	Sensor V1	Sensor S1	Sensor S2	Sensor S5	Sensor S10	S1/V1	S2/V1	S5/V1	S10/V1
1	0,52	0,9	1,2	1,92	3,1	1,7	2,3	3,7	6,0
3	0,54	0,76	1,52	2,2	2,48	1,4	2,8	4,1	4,6
5	0,47	0,69	1,1	1,73	2,1	1,5	2,3	3,7	4,5
8	0,53	0,69	1,35	1,91	2,15	1,3	2,5	3,6	4,1
12	0,21	0,46	0,56	0,72	1,25	2,2	2,7	3,4	6,0



Sensorposities weergegeven op plattegrond woning 3.

Trillingssnelheden V_{top} gemeten op de fundering en de gevel van woning 4 voor verschillende knallen.

Knal	Fundering	Gevel				Verhouding Gevel/Fundering			
	Sensor V1	Sensor S1	Sensor S3	Sensor S5	Sensor S7	S1/V1	S3/V1	S5/V1	S7/V1
1	$\leq 0,2$	1,6	2,7	1,3	0,6	$\geq 8,0$	$\geq 13,5$	$\geq 6,5$	$\geq 3,0$
3	$\leq 0,2$	2,5	4,5	2,3	1	$\geq 12,5$	$\geq 22,5$	$\geq 11,5$	$\geq 5,0$
6	$\leq 0,2$	2,6	4,4	2,6	1	$\geq 13,0$	$\geq 22,0$	$\geq 13,0$	$\geq 5,0$
10	$\leq 0,2$	0,7	1,3	0,6	0,3	$\geq 3,5$	$\geq 6,5$	$\geq 3,0$	$\geq 1,5$
14	$\leq 0,2$	0,5	0,8	0,5	0,2	$\geq 2,5$	$\geq 4,0$	$\geq 2,5$	$\geq 1,0$



Sensorposities weergegeven op plattegrond woning 4.

Aanvulling 2: Grenswaarde voor schade SBR A

De grenswaarde voor schade uit SBR A kan worden bepaald met:

$$V_r = \frac{V_{kar}}{\gamma_t \cdot \gamma_s}$$

Hierbij wordt uitgegaan van:

- De laagste karakteristieke waarde (V_{kar}) uit SBR A tabel 10.8 (hieronder weergegeven)
- De partiële veiligheidsfactor geldend voor een gevoelige bouwkundige staat en/of een monumentale status (γ_t) van 1,7 (hieronder weergegeven)
- De partiële veiligheidsfactor geldend voor kortdurende trillingen (γ_s) van 1,0 (hieronder weergegeven)

Invullen geeft dan $V_r = \frac{5,0}{1,7 \cdot 1,0} = 2,94$ mm/s als grenswaarde voor schade.

Type trilling	Veiligheidsfactor γ_t	
	Draagconstructie en onderdelen	Fundering kans op zettingen
Kortdurend	1,0	1,0
Herhaald kortdurend	1,5	1,6
Continu	2,5	2,0

SBR A tabel 10.6.

Type trilling	Veiligheidsfactor γ_s
Bouwkundige staat: normaal Monumentale status: geen	1,0
Bouwkundige staat: gevoelig en/of Monumentale status: monument	1,7

SBR A tabel 10.7

Frequentie [Hz]	V_{kar} bouwwerk [mm/s]	
	cat. 1	cat. 2
0	20,00	5,00
5	20,00	5,00
10	20,00	5,00
15	22,50	6,25
20	25,00	7,50
25	27,50	8,75
30	30,00	10,00
35	32,50	11,25
40	35,00	12,50
45	37,50	13,75
50	40,00	15,00
55	41,00	15,50
60	42,00	16,00
65	43,00	16,50
70	44,00	17,00
75	45,00	17,50
80	46,00	18,00
85	47,00	18,50
90	48,00	19,00
95	49,00	19,50
100	50,00	20,00

SBR A tabel 10.8.

Aanvulling 3: Berekening van PPV als functie van afstand

Uit literatuur is een vijftal relaties gehaald welke de PPV als functie van geschaalde afstand geven:

- TM 5-855-1 [5]
- Choi & Lee [6]
- ISEE [6]
- USBM [6]
- Dowding [7]

Al deze relaties zijn te schrijven in de vorm:

$$PGV = \alpha \cdot K \cdot \left(\frac{D}{\sqrt[E]{W}} \right)^n$$

Hierin is:

PGV = Peak Ground Velocity

α = grondkoppelfactor (alleen voor TM 5-855-1 relatie)

K = factor voor hoeveelheid energie die daadwerkelijk de grond exciteert

n = dempingsfactor van de bodem

E = 2 (kwadratische) of 3 (kubische) schaling

W = explosief massa (per delay)

D = afstand tussen detonatielocatie tot gebouw

Het type explosief is ook van belang (het explosief C4 is bijvoorbeeld krachtiger dan TNT) maar wordt niet meegenomen in de relaties. Voor TM 5-855-1 wordt uitgegaan van C4, maar voor de andere referenties is dit niet duidelijk of niet gegeven.

De relaties uit TM 5-855-1 [5] en Dowding [7] worden gegeven voor zowel ondergrondse en bovengrondse explosies.

De relatie uit TM 5-855-1 [5] is gegeven in US eenheden (ft en lbs). Om deze relatie direct te kunnen vergelijken met de andere drie relaties (die in SI-eenheden zijn) dient de relatie als volgt omgeschreven te worden:

$$PGV = \alpha \cdot 160 \cdot \left(\frac{\frac{R}{\left(\frac{[m]}{[ft]}\right)}}{\left(\frac{W}{\left(\frac{[kg]}{[lbs]}\right)}\right)^{\frac{1}{3}}}\right)^{-n} \cdot \left(\frac{[m]}{[ft]}\right) \cdot 100 \left[\frac{cm}{s}\right]$$

De factor K dient ook omgeschreven te worden (uitgaande van $n = -1.5$):

$$160 \cdot \frac{[ft]}{[m]} \cdot \left(\frac{1}{\frac{[ft]}{[m]}} \right)^{-1.6} \cdot \left(\frac{[lbs]}{[kg]} \right)^{\frac{1}{3} - 1.6} = 1218 \left[\frac{cm}{s}\right]$$

In onderstaande tabel zijn de parameters voor de verschillende relaties uit de literatuur weergegeven. Door voor iedere relatie een explosieve massa van 18 kg in te vullen evenals een range afstanden (van 10 m tot 10000 m met stappen van 10 m) wordt viermaal de PGV als functie van afstand verkregen. Voor de TM 5-855-1 relatie wordt een range aan α en n waarden gegeven.

Parameters voor de verschillende relaties tussen PPV en afstand. Een (*) betekent een bovengrondse explosie.
N/A = not applicable, - = geen informatie.

	α [-]	K [cm/s]	n [-]	E [-]	Explosief	W [kg]	D [m]
TM 5-855-1	0.14-1.0	1218	-1.5 tot -3.1	3	C4	18	10 tot 10000
Choi & Lee	N/A	74.9	-1.535	2	-	18	10 tot 10000
ISEE	N/A	172.5	-1.6	2	-	18	10 tot 10000
USBM	N/A	71.4	-1.6	2	-	18	10 tot 10000
Dowding	N/A	178	-1.46	3	-	18	10 tot 10000
Dowding*	N/A	8191	-1.6	3	-	18	10 tot 10000

Voor de relatie weergegeven die eerder is weergegeven (in de eerste figuur onder “Detonatie-geïnduceerde grondtrillingen met afstand”) zijn de meest conservatieve waarden ($\alpha = 1.0$ geldend voor een volledig begraven explosief en $n = -1.5$ geldend voor waterverzadigde klei) aangenomen.

De PGV-relaties geven een inschatting van het trillingsniveau in de grond. Dit is vergelijkbaar met het resultaat verkregen met een indicatieve meting volgens SBR A. Om het trillingsniveau op basis van een indicatieve meting te kunnen beoordelen geeft SBR A een partiële veiligheidsfactor $\gamma_v = 1,6$. De PGV-waarden verkregen uit de relaties zijn daarom vermenigvuldigd met deze factor:

$$PPV = 1,6 \cdot PGV$$

De PPV-resultaten verkregen met de zes relaties zijn weergegeven in de eerder in deze bijlage getoonde figuur (de eerste figuur onder “Detonatie-geïnduceerde grondtrillingen met afstand”).

Referenties

- [1] Van der Eerden, F.J.M., Bronkhorst, A.J., Jansen, E.W., Kruijen, A., 2017, Het gebruik van geluidmetingen van detonaties op de Vliehors voor de bepaling van de kans op schade aan woningen, TNO 2017 R10606.
- [2] Bronkhorst, A.J., van der Eerden, F.J.M., 2016, Trillingsmetingen bij het Artillerie Schietkamp te Oldebroek: Toetsing op hinder en schade van woningen in de omgeving, TNO 2016 R11226.
- [3] Staalduinen, P.C., Smits, M.H.Th.J., Waarts, P.H., 1991, Trillingsonderzoek ten behoeve van het handboek damwanden, B-91-0705, TNO Bouw.
- [4] Gad, E.F., Wilson, J.L., Moore, A.J., Richards, A.B., 2005, Effects of mine blasting on residential structures, Journal of Performance of Constructed Facilities.
- [5] Department of the Army Technical Manual TM 5-855-1, 1985, Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons, Washington DC.
- [6] Choi, S., Lee, S., 2021, Predictive Modelling for Blasting-Induced Vibrations from Open-Pit Excavations, Appl. Sciences, 11, 7487.
- [7] Dowding, C.H., 1996, Construction vibrations, Upper Saddle River, NJ Prentice-Hall.

BIJLAGE 2

Beoordeling trillingsschade op basis van geluidsdruk voor gebouwen rond het ASK

Inleiding

Bij de vergunningaanvraag in 2023 is voor de beoordeling van trillingsschade aan gebouwen rond het ASK gebruik gemaakt van een grenswaarde $L_x = 110$ dB. Deze grenswaarde is afgeleid in TNO 2017 R10606 [1] voor trillingsschade aan gebouwen op Texel door oefeningen van Defensie op de Vliehors. De grenswaarde is bepaald door middel van berekeningen aan gebouwen op Texel met behulp van een rekenmodel [2], wat is ontwikkeld door TNO om geveltrillingen in gebouwen te bepalen ten gevolge van laagfrequente geluidsgolven die optreden bij explosies. ILT stelt in de ontwerpbeschikking [3] dat:

- Een beschrijving van het model ontbreekt waardoor de resultaten van de berekeningen waarmee de grenswaarde is verkregen niet verifieerbaar zijn.
- Niet duidelijk is waarom gebruikelijke methodes zoals onderzoek op basis van trillingsmetingen aan de bron in combinatie met overdrachtsberekeningen voor het grondpad, zoals Barkan, niet toepasbaar zijn voor het ASK.
- Dat de effecten voor trillingsgevoelige gebouwen in de omgeving van het ASK bij toepassing van de grenswaarde $L_x = 110$ dB onvoldoende vast staan.

Deze bijlage geeft eerst een beschrijving van het rekenmodel en de berekeningen die zijn uitgevoerd voor bepaling van de grenswaarde $L_x = 110$ dB. Daarbij wordt ingegaan op de toepasbaarheid van deze grenswaarde voor gebouwen rond het ASK, en wordt toegelicht waarom gebruikelijke rekenmodellen voor het overdrachtspad via de grond niet van toepassing zijn voor het ASK. Vervolgens worden de berekeningen beschreven, die zijn uitgevoerd om tot een grenswaarde te komen voor de gebouwen rond het ASK.

Rekenmodel en grenswaarde L_x

Rapport MON-RPT-2010-03086 [2] geeft de theoretische beschrijving van het rekenmodel waarmee op basis van een geluidsdruk op de gevel een trillingsniveau in die gevel bepaald kan worden. In dit rapport is ook een vergelijking gemaakt van meetresultaten verkregen aan een gebouw nabij de Winkelmankazerne met resultaten verkregen met dit rekenmodel. In rapport TNO 2017 R10606 [1] is een vergelijking gemaakt voor een gebouw op Texel waar metingen aan zijn uitgevoerd bij verschillende detonaties op de Vliehors. Uit deze vergelijking blijkt dat het rekenmodel een goede overeenkomst geeft met gemeten V_{top} waarden (verschillen $\leq 0,2$ mm/s).

Een belangrijk uitgangspunt voor toepassing van dit rekenmodel is dat de trillingen in het gebouw worden veroorzaakt door drukgolven die via de lucht het gebouw aanstoten (het luchtpad). In dit geval zijn modellen waarmee de trillingsoverdracht via de grond wordt bepaald (zoals Barkan) niet van toepassing. In bijlage 1 is onderbouwd dat voor gebouwen rond het ASK het luchtpad het dominante overdrachtspad is.

Op basis van berekeningen voor verschillende variaties aan bouwparameters is in rapport TNO 2017 R10606 [1] een grenswaarde $L_x = 110$ dB afgeleid, met L_x het geluidexpositieniveau in een bandbreedte van 1 Hz tot 100 Hz is. Om deze grenswaarde te kunnen bepalen, zijn met het rekenmodel berekeningen uitgevoerd aan verschillende gebouw variaties. Op basis van een studie van een deel van de gebouwen op Texel (De Cocksdorp) zijn de volgende parameters gekozen:

- Damping gevel 1%
- Oppervlaktemassa gevel 400 kg/m^2
- Dikte gevel 220 mm
- Gevelhoogte tussen 3 m en 10 m
- Gevelbreedte tussen 4 en 16 m

Daarbij is er verder een grens gesteld van 120 m² aan het geveleppervlak. Voor de berekeningen zijn de hoogte en breedte gevarieerd met een stapgrootte van 0,5 m. In de parameterstudie is van gebouwcategorie 2 uitgegaan en is geen rekening gehouden met de trillingsgevoeligheid van gebouwen. De reden hiervoor was dat het overgrote deel van de gebouwen in en rond De Cocksdorp in categorie 2 viel, volgens de beschrijving in de destijds vigerende uitgave van de SBR A-richtlijn [4]. Vier gebouwen werden wel als trillingsgevoelig geïdentificeerd op basis van monumentale status. Voor deze gebouwen is apart een berekening gemaakt, waarbij expliciet rekening is gehouden met de invloed van de trillingsgevoeligheid op de grenswaarde.

Bepaling grenswaarde L_x voor ASK

Bij de vergunningaanvraag in 2023 is aangenomen dat de grenswaarde L_x = 110 dB bepaald voor de Vliehors ook van toepassing is voor het ASK. Voor de gekozen parameterwaarden voor demping, gevel oppervlaktemassa, dikte, hoogte en breedte is deze aanname te onderbouwen. De gevels van de gebouwen uit de klachteninventarisatie van het ASK (zie bijlage 5) worden goed beschreven door de gespecificeerde waarden in de vorige paragraaf. Voor een groot aantal gebouwen rond het ASK is het echter onwaarschijnlijk dat het uitgangspunt niet-trillingsgevoelig aangehouden kan worden. Om tot een conservatieve inschatting te komen voor alle gebouwen rond het ASK, is ervoor gekozen de berekeningen voor bepaling van de grenswaarde voor L_x opnieuw uit te voeren. In dit geval uitgaande van de grenswaarde voor trillingsgevoelige gebouwen volgens de huidige SBR A [6]:

$$V_r = V_{kar} / (\gamma_t \cdot \gamma_s) \quad (1)$$

Waarin V_{kar} de frequentie-afhankelijke karakteristieke grenswaarde is voor gebouwcategorie 2 (zie figuur 10.3 in SBR A [6]). De partiële veiligheidsfactor γ_t brengt het type trilling in rekening; hier geldt $\gamma_t = 1$, voor een kortdurende trilling. De partiële veiligheidsfactor γ_s geldt voor de bouwkundige staat en de monumentale status; hier wordt uitgegaan van $\gamma_s = 1,7$. Als laatste punt is het de vraag of de druksignalen gemeten op Texel (De Cocksdorp) van toepassing zijn voor het ASK, aangezien op de Vliehors de ladinggroottes die tot detonatie worden gebracht groter zijn dan de ladingen die op het ASK worden gedetoneerd en de afstand tussen de bronlocatie en de gebouwen groter is. Daarom wordt in de berekeningen voor het ASK gebruik gemaakt van de druksignalen gemeten nabij de 4 woningen.

Onderstaande tabel presenteert de resultaten van de laagste maximaal toelaatbare geluidsniveaus L_x over alle rekenresultaten bepaald voor 15 explosies uitgevoerd bij de 4 onderzochte woningen nabij het ASK in TNO 2016 R11226 [7]; De knalnummering komt overeen met die gehanteerd in deze rapportage. De resultaten in de tabel zijn op dezelfde manier verkregen als de resultaten in tabel 6 van TNO 2017 R10606 [1], maar dan voor geluid-druksignalen gemeten bij het ASK en uitgaande van trillingsgevoelige gebouwen. Dit houdt in dat voor elke knal berekeningen zijn uitgevoerd voor alle parametervariëaties zoals gedefinieerd in de voorgaande paragraaf (er is effectief dus geen relatie meer met de eigenschappen van woning 1, 2, 3 en 4). Het laagste toelaatbare geluidsniveau van alle berekeningen is gespecificeerd in onderstaande tabel. Op basis van deze resultaten wordt aanbevolen om voor het ASK een grenswaarde L_x = 105 dB te hanteren, in plaats van L_x = 110 dB bepaald voor de Vliehors.

Conclusie

Deze bijlage gaat in op de beoordeling van trillingsschade aan gebouwen rond het ASK op basis van de grenswaarde L_x = 110 dB afgeleid voor de Vliehors. Eerst is het rekenmodel en de bepalingsmethode van de grenswaarde op hoofdlijnen beschreven, en zijn de documenten gespecificeerd waarin het model en de methode uitgebreider worden toegelicht. In de notitie is uitgelegd waarom de gehanteerde methode van toepassing is voor het ASK, en waarom niet gebruik gemaakt kan worden van gebruikelijke methodes zoals onderzoek op basis van trillingsmetingen aan de bron in combinatie met berekeningen voor het overdrachtspad via de grond.

Geconcludeerd is dat de grenswaarde $L_x = 110$ dB, welke is afgeleid voor de Vliehors, niet zonder meer van toepassing is voor het ASK. Nieuwe berekeningen zijn uitgevoerd welke zijn gericht op de specifieke situatie van het ASK. Hierbij zijn geluidsdruksignalen toegepast, die zijn gemeten bij de 4 woningen nabij het ASK, en is uitgegaan van de grenswaarde uit SBR A voor trillingsgevoelige gebouwen. Op basis van deze uitgangspunten is een grenswaarde $L_x = 105$ dB voor het ASK bepaald.

TNO merkt hierbij op dat voor niet-trillingsgevoelige gebouwen in principe een hogere grenswaarde voor de geluidsdruk van toepassing zal zijn. Een analyse per gebouw(type) nabij het ASK zal in een minder conservatieve beoordeling resulteren dan volgend uit de analyse in deze bijlage. Dit vergt echter gedetailleerde informatie over de eigenschappen van de gebouwen rond het ASK en een uitgebreidere analyse dan uitgevoerd in deze bijlage.

De laagste maximaal toelaatbare geluidsniveaus L_x bepaald op basis van de 15 geluidsmetingen uitgevoerd bij de vier onderzochte woningen nabij het ASK in TNO 2016 R11226 [7].

	Geluidsniveau L_x [dB]			
Knal	Woning 1	Woning 2	Woning 3	Woning 4
Knal 1	-	105	109	107
Knal 2	106	106	108	108
Knal 3	107	106	107	109
Knal 4	108	107	106	107
Knal 5	107	106	108	108
Knal 6	107	105	108	110
Knal 7	105	105	106	105
Knal 8	105	105	106	105
Knal 9	107	106	107	106
Knal 10	107	106	107	106
Knal 11	107	106	107	106
Knal 12	107	106	107	106
Knal 13	107	107	106	106
Knal 14	108	106	106	107
Knal 15	107	105	107	106

Referenties

- [1] Van der Eerden, F., Bronkhorst, A.J., Jansen, E., Kruijven, A., Het gebruik van geluidmetingen van detonaties op de Vliehors voor de bepaling van de kans op schade aan woningen, TNO 2017 R10606, Den Haag, 2017.
- [2] Jansen, H.W., Galanti, F., Voorspellen van geveltrillingen en schade aan gebouwen ten gevolge van laagfrequente geluidsgolven bij explosies, MON-RPT-2010-03086, Delft, 2010.
- [3] ILT, (Ontwerp)beschikking, Weigering aanvraag Revisievergunning Artillerie Schietkamp (ASK), 2023/1530, Den Haag, 2023.
- [4] SBR, SBR trillingsrichtlijn A: Schade aan bouwwerken, Delft, 2006.
- [5] SBRCURnet, SBR trillingsrichtlijn A: Schade aan bouwwerken, Delft, 2017.
- [6] Bronkhorst, A.J., van der Eerden, F.J.M., Trillingsmetingen bij het Artillerie Schietkamp te Oldebroek: Toetsing op hinder en schade van woningen in de omgeving, TNO 2016 R11226, Den Haag, 2016.

BIJLAGE 3

Overzicht van wapens en bronlocaties voor trillingen

In onderstaande tabellen is voor verschillende beoordelingspunten bij woningen dichtbij het ASK aangegeven welke combinaties van wapens en bronlocaties voor trillingen in het beoordelingspunt van belang zijn. In de kolom 'afstand' is de afstand aangegeven tussen de bronlocatie en het beoordelingspunt. De kolom Lx geeft het berekende geluidexpositieniveau bij de woning en rechts daarnaast staat de uit Lx berekende trillingssnelheid $V_{eff,max}$. Voor de grenswaarde aan $V_{eff,max}$ is het aantal schokken bepaald met $V_{eff,max} > 0,2$ uit de drie kolommen links van de laatste kolom.

Beoordelingspunt	woning		wapen	bronlocatie	afstand [m]	richting	Lx 1-100 Hz	Veff,max	aantal per jaar per bronlocatie		totaal Vmax,eff ≥ 0,20	grens Veff,max
	bouwjaar	constructie							dag	avond		
15 Bongersweg 22 t Loo Oldebroek	1975	steen, pannendak	155 mm HE M107 detonatie	doelengebied groot	2539		102,9	1,92	280	0	14320	2,0
			155 mm HE lading 4/5 wit	paal 10 en 15	6956	30	79,1	0,12	280	0		
			120 mm lading 6	paal 22	3575	60	89,9	0,43	2650	400		
			120 mm lading 6	paal 20	4579	60	86,3	0,28	2650	400		
			155 mm lading 8 type 13*	Hojelbaan	3770	60	96,8	0,96	1280	0		
			120 mm HE 104 detonatie	doelengebied groot	2539		102,3	1,79	4500	500		
			120 mm HE 104 detonatie	doelengebied klein	3384		98,2	1,12	120	0		
			18 kg TNT 2 m ingegraven	CP-XI	3074		92,3	0,57	100	0		
			10 kg TNT 2 m ingegraven	CP-XI	3074		87,6	0,33	150	0		
			5 kg TNT 1 m ingegraven	CP-XI	3074		92,4	0,58	1000	0		
			18 kg TNT 2 m ingegraven	CP7A	2943		92,9	0,61	50	0		
			10 kg TNT 2 m ingegraven	CP7A	2943		88,2	0,36	50	0		
			5 kg TNT 1 m ingegraven	CP7A	2943		93,1	0,62	50	0		
			Horizontaal effectwapen (HEW)	CP7A	2943		93,5	0,65	10	0		
			155 mm HE M107 detonatie	CP7A	2943		100,8	1,51	40	0		
			120 mm HE 104 detonatie	CP7A	2943		100,2	1,41	40	0		
			18 kg TNT 2 m ingegraven	Galerij A/B	2727		94,1	0,70	20	0		
			Horizontaal effectwapen (HEW)	Galerij A/B	2727		94,6	0,74	10	0		
			10 kg TNT 2 m ingegraven	Galerij Charley	2982		88,0	0,35	10	0		
			Horizontaal effectwapen (HEW)	Galerij Charley	2982		93,3	0,64	10	0		
34 Eperweg 137 t Harde	1936	steen, pannendak	155 mm lading 8 type 13*	Hojelbaan	1923	120	101,9	1,72	1280	0	17860	1,8
			155 mm HE lading 4/5 wit	paal 15 en 10	2804	30	93,6	0,66	280	0		
			155 mm HE lading 4/5 wit	paal 14 en 11	2682	30	94,2	0,71	1750	600		
			155 mm HE lading 4/5 wit	paal 5, 2 en 8	4337	30	84,8	0,24	1000	100		
			155 mm HE M107 detonatie	doelengebied groot	5257		92,2	0,57	280	0		
			120 mm HE 104 detonatie	doelengebied groot	5257		91,7	0,53	4500	500		
			120 mm lading 6	paal 22	1508	150	98,9	1,21	2650	400		
			120 mm lading 6	paal 20	2662	90	93,2	0,63	2650	400		
			120 mm lading 6	paal 14 en 11	2682	30	95,2	0,80	120	0		
			120 mm HE 104 detonatie	doelengebied klein	2940		100,2	1,41	120	0		
			18 kg TNT 2 m ingegraven	CP-XI	6268		81,1	0,16	100	0		
			10 kg TNT 2 m ingegraven	CP-XI	6268		76,4	0,09	150	0		
			5 kg TNT 1 m ingegraven	CP-XI	6268		81,3	0,16	1000	0		
			18 kg TNT 2 m ingegraven	CP7A	5387		83,1	0,20	50	0		
			10 kg TNT 2 m ingegraven	CP7A	5387		79,7	0,13	50	0		
			5 kg TNT 1 m ingegraven	CP7A	5387		85,0	0,25	50	0		
			Horizontaal effectwapen (HEW)	CP7A	5387		85,2	0,25	10	0		
			155 mm HE M107 detonatie	CP7A	5387		91,9	0,55	40	0		
			120 mm HE 104 detonatie	CP7A	5387		91,4	0,51	40	0		
			18 kg TNT 2 m ingegraven	Galerij A/B	3591		89,9	0,43	20	0		
			Horizontaal effectwapen (HEW)	Galerij A/B	3591		90,7	0,47	10	0		
			10 kg TNT 2 m ingegraven	Galerij Charley	4091		82,9	0,19	10	0		
			Horizontaal effectwapen (HEW)	Galerij Charley	4091		88,7	0,38	10	0		
35 Bovendwarsweg 69 Oldebroek	1957	plat dak	155 mm lading 8 type 13*	Hojelbaan	2379	90	102,2	1,78	1280	0	16750	1,8
			120 mm lading 6	paal 22	1922	90	97,3	1,02	2650	400		
			120 mm lading 6	paal 20	3380	60	90,7	0,47	2650	400		
			120 mm lading 6	paal 14 en 11	4523	30	81,7	0,17	1750	600		
			120 mm HE 107 detonatie	doelengebied klein	2850		100,7	1,49	120	0		
			120 mm HE 107 detonatie	doelengebied groot	4186		94,9	0,77	4500	500		
			155 mm HE M107 detonatie	doelengebied groot	4186		95,5	0,82	280	0		
			155 mm HE lading 4/5 wit	paal 15 en 10	4638	30	83,8	0,21	280	0		
			155 mm HE lading 4/5 wit	paal 14 en 11	4523	30	84,2	0,22	1750	600		
			155 mm HE lading 4/5 wit	paal 5, 2 en 8	6170	30	80,4	0,15	1000	100		
			18 kg TNT 2 m ingegraven	CP-XI	5091		84,0	0,22	100	0		
			10 kg TNT 2 m ingegraven	CP-XI	5091		79,3	0,13	150	0		
			5 kg TNT 1 m ingegraven	CP-XI	5091		84,1	0,22	1000	0		
			18 kg TNT 2 m ingegraven	CP7A	4438		86,2	0,28	50	0		
			10 kg TNT 2 m ingegraven	CP7A	4438		81,5	0,17	50	0		
			5 kg TNT 1 m ingegraven	CP7A	4438		86,4	0,29	50	0		
			Horizontaal effectwapen (HEW)	CP7A	4438		87,6	0,33	10	0		
			155 mm HE M107 detonatie	CP7A	4438		94,6	0,74	40	0		
			120 mm HE 104 detonatie	CP7A	4438		94,0	0,69	40	0		
			18 kg TNT 2 m ingegraven	Galerij A/B	2991		92,7	0,60	20	0		
			Horizontaal effectwapen (HEW)	Galerij A/B	2991		93,2	0,63	10	0		
			10 kg TNT 2 m ingegraven	Galerij Charley	3507		85,6	0,26	10	0		
			Horizontaal effectwapen (HEW)	Galerij Charley	3507		91,0	0,49	10	0		

woning				afstand		Lx	Veff,max	aantal per jaar		totaal	grens							
Beoordelingspunt	bouwjaar	constructie	wapen	bronlocatie	[m]	richting	1-100 Hz	per bronlocatie	dag	avond	Vmax,eff ≥ 0,20	Veff,max						
36	Bovendwarsweg 83a Oldebroek	1999	steen, pannendak	155 mm lading 8 type 13*	Hojelbaan	2640	60	102,1	1,75	1280	0	14130	2,0					
				120 mm lading 6	paal 22	2239	60	96,4	0,91	2650	400							
				120 mm lading 6	paal 20	3630	60	91,7	0,53	2650	400							
				120 mm HE 107 detonatie	doelengebied klein	2887		100,5	1,46	120	0							
				120 mm HE 107 detonatie	doelengebied groot	3791		96,4	0,92	4500	500							
				155 mm HE M107 detonatie	doelengebied groot	3791		97,0	0,98	280	0							
				155 mm HE lading 4/5 wit	paal 15 en 10	5199	30	82,3	0,18	280	0							
				155 mm HE lading 4/5 wit	paal 14 en 11	5098	30	82,6	0,19	1750	600							
				18 kg TNT 2 m ingegraven	CP-XI	4642		85,5	0,26	100	0							
				10 kg TNT 2 m ingegraven	CP-XI	4642		80,8	0,15	150	0							
				5 kg TNT 1 m ingegraven	CP-XI	4642		85,6	0,26	1000	0							
				18 kg TNT 2 m ingegraven	CP7A	4080		87,7	0,33	50	0							
				10 kg TNT 2 m ingegraven	CP7A	4080		83,0	0,19	50	0							
				5 kg TNT 1 m ingegraven	CP7A	4080		87,8	0,34	50	0							
				Horizontaal effectwapen (HEW)	CP7A	4080		88,7	0,38	10	0							
				155 mm HE M107 detonatie	CP7A	4080		95,8	0,86	40	0							
				120 mm HE 104 detonatie	CP7A	4080		95,2	0,80	40	0							
				18 kg TNT 2 m ingegraven	Galerij A/B	2829		93,5	0,66	20	0							
				Horizontaal effectwapen (HEW)	Galerij A/B	2829		94,1	0,70	20	0							
				10 kg TNT 2 m ingegraven	Galerij Charley	3318		86,5	0,29	10	0							
				27	Verlengde Haerderweg 29 Doornspijk	1999	steen, plat dak	Horizontaal effectwapen (HEW)	Galerij Charley	3318		91,8		0,54	10	0		
155 mm lading 4/5 wit	paal 14	2056	90					91,4	0,51	875	300	16846	1,8					
155 mm lading 4/5 wit	paal 11	2784	90					90,2	0,45	875	300							
155 mm lading 4/5 wit	paal 15 en 10	2386	90					89,7	0,42	280	0							
155 mm HE lading 4/5 wit	paal 5, 2 en 8	2787	60					91,8	0,54	1000	100							
155 mm HE M107 detonatie	doelengebied groot	7925						87,4	0,32	280	0							
155 mm lading 8 type 13*	Hojelbaan	4401	150					90,4	0,46	1280	0							
120 mm lading 6	paal 11	2784	90					92,6	0,59	60	0							
120 mm lading 6	paal 14	2056	90					96,4	0,91	60	0							
120 mm lading 6	paal 22	4090	150					85,5	0,26	2650	400							
120 mm lading 6	paal 20	4816	120					84,4	0,23	2650	400							
120 mm HE 104 detonatie	doelengebied klein	5486						91,1	0,50	120	0							
120 mm HE 104 detonatie	doelengebied groot	7925						86,8	0,30	4500	500							
18 kg TNT in kuil	springput 1	2949						107,6	3,32	50	0							
9 kg TNT in kuil	springput 1	2949						101,5	1,64	50	0							
5 kg TNT in kuil	springput 1	2949						98,9	1,21	50	0							
1 kg TNT in kuil	springput 1	2949						88,3	0,36	50	0							
2 kg TNT kruislading op wand	trainingswand	3514						97,5	1,03	12	4							
10	Eperweg 133 Nunspeet	1982	steen, pannendak					155 mm lading 4/5 wit	paal 2 en 5	1570	120	94,2		0,71	666	66	12116	2,2
								155 mm lading 4/5 wit	paal 8	2557	120	88,3		0,36	334	34		
								155 mm lading 4/5 wit	paal 14 en 11	3359	150	84,5		0,23	1750	600		
				155 mm lading 4/5 wit	paal 15 en 10	3477	150	86,1	0,28	1750	600							
				120 mm lading 6	paal 14 en 11	3359	150	88,4	0,36	2650	400							
				120 mm lading 6	paal 20	6905	120	73,1	0,06	2650	400							
				18 kg TNT in kuil	springput 1	3654		101,8	1,69	50	0							
				9 kg TNT in kuil	springput 1	3654		98,2	1,13	50	0							
				5 kg TNT in kuil	springput 1	3654		95,6	0,83	50	0							
				1 kg TNT in kuil	springput 1	3654		85,2	0,25	50	0							
				2 kg TNT kruislading op wand	trainingswand	4746		93,6	0,66	12	4							
				155 mm lading 4/5 wit	paal 11	2849	60	89,0	0,39	875	300	13086	2,1					
				120 mm lading 6	paal 11	2849	60	93,2	0,63	60	0							
				120 mm lading 6	paal 14	3318	90	90,1	0,44	60	0							
				120 mm lading 6	paal 20	2665	150	91,6	0,53	2650	400							
				120 mm lading 6	paal 22	3879	120	87,6	0,33	2650	400							
				120 mm HE 104 detonatie	doelengebied klein	3941		95,8	0,85	120	0							
				155 mm HE M107 detonatie	doelengebied groot	6515		89,7	0,42	280	0							
				120 mm HE 104 detonatie	doelengebied groot	6515		89,9	0,43	4500	500							
				18 kg TNT in kuil	springput 1	2508		107,3	3,20	50	0							
				9 kg TNT in kuil	springput 1	2508		103,8	2,13	50	0							
5 kg TNT in kuil	springput 1	2508		101,2	1,58	50	0											
1 kg TNT in kuil	springput 1	2508		90,6	0,47	50	0											
2 kg TNT kruislading op wand	trainingswand	1808		106,2	2,84	12	4											
Slagsnoer 50 g Flexlat	trainingswand	1808		82,1	0,18	40	10											
Blade 120 g	trainingswand	1808		85,9	0,27	40	5											
Fixor 150 g	trainingswand	1808		86,8	0,30	20	10											
44	Woldbergweg 4 Epe	1939	steen, rieten dak	155 mm lading 4/5 wit	paal 11	2206	60	92,3	0,57	875	300	13136		2,1				
				120 mm lading 6	paal 11	2206	60	96,6	0,93	60	0							
				120 mm lading 6	paal 14	2498	90	94,1	0,70	60	0							
				120 mm lading 6	paal 20	2044	150	95,0	0,78	2650	400							
				120 mm lading 6	paal 22	3028	120	91,2	0,50	2650	400							
				120 mm HE 104 detonatie	doelengebied klein	3367		98,3	1,13	120	0							
				155 mm HE M107 detonatie	doelengebied groot	6097		90,4	0,46	280	0							
				120 mm HE 104 detonatie	doelengebied groot	6097		89,9	0,43	4500	500							
				18 kg TNT in kuil	springput 1	1815		110,8	4,81	50	0							
				9 kg TNT in kuil	springput 1	1815		107,3	3,21	50	0							
				5 kg TNT in kuil	springput 1	1815		104,7	2,38	50	0							
				1 kg TNT in kuil	springput 1	1815		94,4	0,73	50	0							
				2 kg TNT kruislading op wand	trainingswand	873		112,4	5,79	12	4							
				Slagsnoer 50 g Flexlat	trainingswand	873		88,9	0,38	40	10							
				Blade 120 g	trainingswand	873		92,2	0,57	40	5							
				Fixor 150 g	trainingswand	873		93,6	0,66	20	10							

BIJLAGE 4

Dominante pad voor trillinghinder

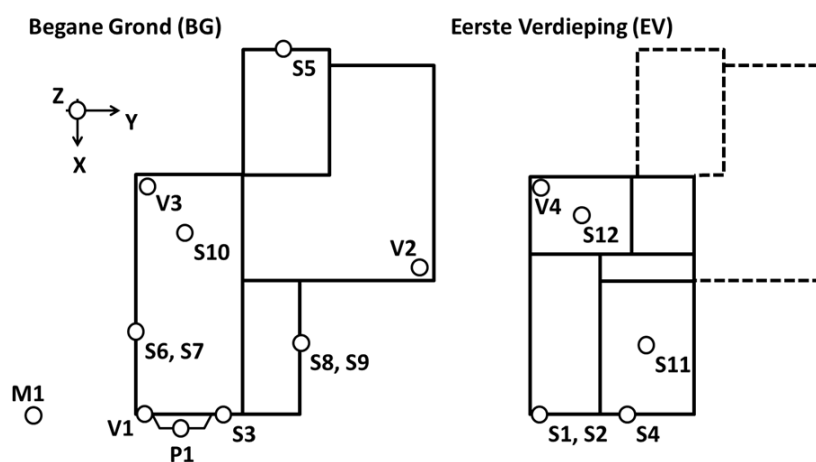
Inleiding

Bij de beoordeling van trillinghinder in de onderzochte gebouwen rond het ASK in rapport TNO 2016 R11226 [1] is voor 4 woningen een relatie gelegd tussen luchtdruk en gemeten trillingsniveaus op vloeren, het zogenaamde luchtpad. ILT geeft in de ontwerpbeschikking [3] aan dat onvoldoende is aangetoond dat de overdracht door de bodem niet bepalend is. In deze notitie wordt op basis van de uitgevoerde metingen onderbouwd dat de vloertrillingen gemeten in de 4 woningen zijn veroorzaakt door drukgolven via de lucht en dat andere paden ondergeschikt zijn. ILT heeft ook de vraag gesteld of uit de metingen aan de 4 woningen verondersteld mag worden dat het luchtpad nog altijd dominant is voor andere gebouwen rondom het ASK. In deze notitie wordt aangetoond dat het luchtpad nog steeds dominant is als de 4 typen woningen zich op een andere afstand tot het punt van detonatie zouden bevinden. De resultaten worden verder onderbouwd door de metingen te vergelijken met conservatieve relaties uit de literatuur voor het trillingsniveau als functie van de afstand tot het punt van detonatie voor het grondpad en lucht-grondpad.

Onderbouwing dominante pad bemeten gebouwen

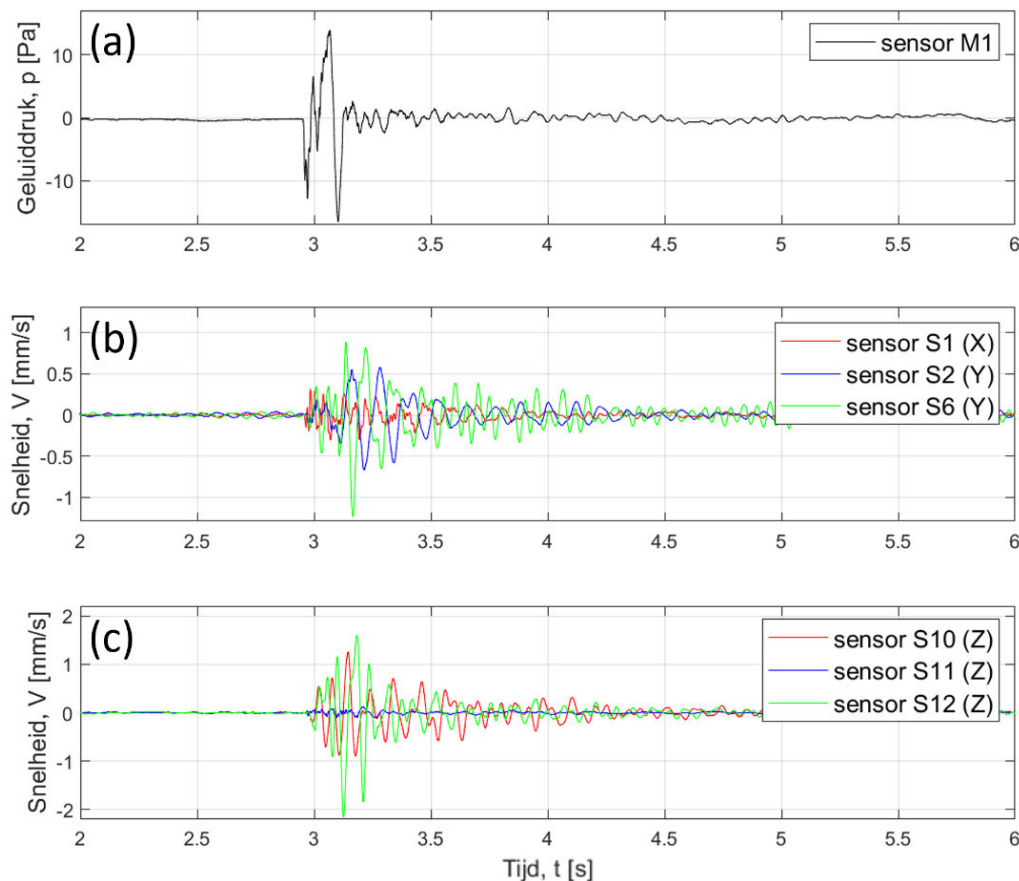
Selectie van de gebouwen voor metingen

In rapport TNO 2016 R11226 [1] zijn de resultaten beschreven van metingen aan 4 gebouwen rond het ASK. De sensorposities van woning 1 zijn hieronder weergegeven, de sensorposities voor de andere woningen zijn te vinden in aanvulling 1. De sensoren M1 en S1 – S12 zijn tijdsynchroon geregistreerd met één meetsysteem. De sensoren V1 – V4 betroffen losstaande Vibra meetsystemen, die alleen bij trillingsniveaus groter dan 0,2 mm/s een V_{top} en een V_{max} waarde registreerden, en waar maar in een paar gevallen een tijdsignaal is geregistreerd. De signalen gemeten met sensoren V1 – V4 zijn niet tijdsynchroon gemeten met de signalen gemeten door sensoren M1 en S1-S12.



Sensorposities weergegeven op plattegrond woning 1.

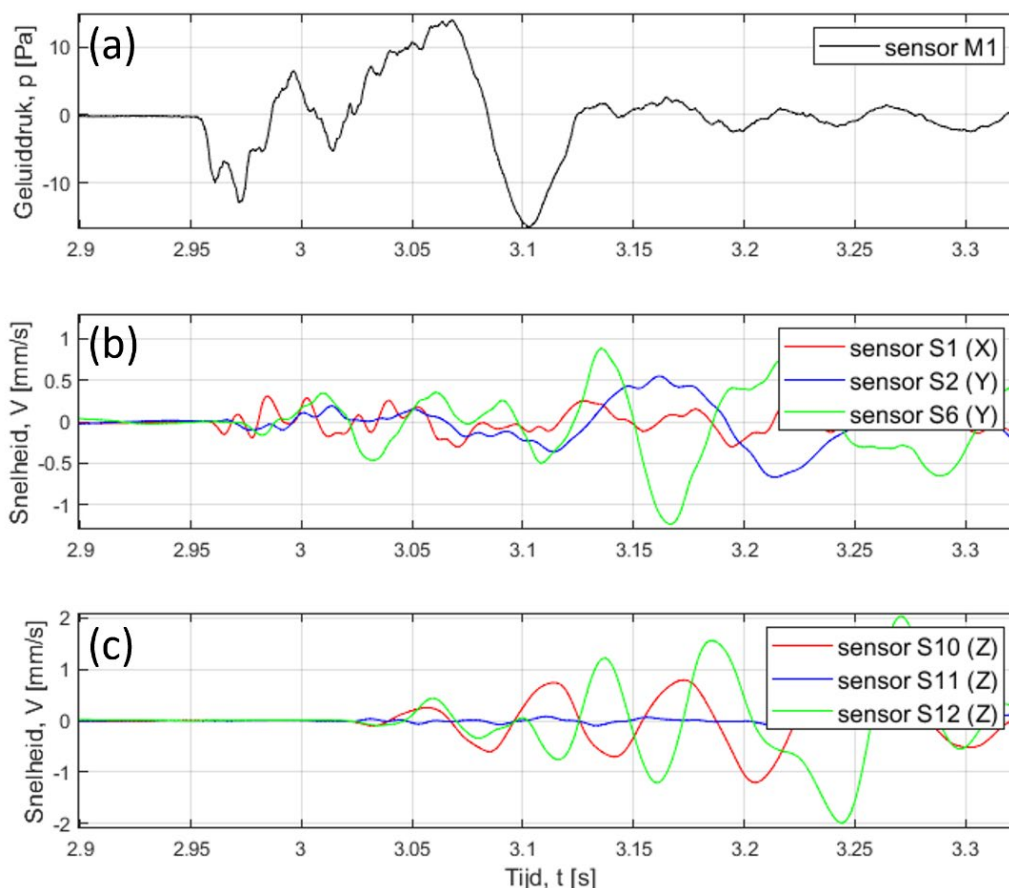
Tijdens de metingen beschreven in [1] zijn bij elke detonatie op het ASK signalen geregistreerd, zoals weergegeven in onderstaande figuur. De signalen zijn gemeten aan woning 1, nadat op het ASK een explosie ten gevolge van het ruimen van een lading van 15 kg had plaatsgevonden. Figuur (a) geeft het druksignaal gemeten door sensor M1, figuur (b) de trillingen gemeten aan de gevel door sensor S1, S2 en S6 en figuur (c) de vloertrillingen gemeten door sensor S10, S11 en S12. Te zien is dat de vloer- en geveltrillingen bijna gelijktijdig optreden met het gemeten druksignaal.



Signalen gemeten aan woning 1 na het ruimen van een lading van 15 kg (knaal 6): (a) geluidsdruksignaal, (b) trillingssnelheden op de gevels, (c) trillingssnelheden in het midden van de vloeren.

In onderstaande figuur is ingezoomd op het begin van het signaal tussen seconde 2,9 en 3,3. In dit signaal is te zien dat de geveltrillingen ongeveer 0,01 s aanvangt nadat het druksignaal begint. Uitgaande van een geluidssnelheid in lucht van 343 m/s komt dit tijdsverschil goed overeen met de afstand tussen de microfoon en de woning. De vloertrillingen beginnen ongeveer 0,05 s na de gevel te trillen.

Bijlage A geeft dezelfde grafieken voor de andere 3 woningen. In alle grafieken is te zien dat het druksignaal en de trillingssignalen bijna gelijktijdig beginnen, en dat de gevel korte tijd na het druksignaal begint te trillen, en dat kort daarna de vloeren beginnen te trillen.



Detail (seconde 2,9 tot 3,3) van signalen gemeten aan woning 1 na het ruimen van 15 kg (knal 6):
 (a) geluidsdruksignaal nabij de woning, (b) trillingssnelheden op de gevels,
 (c) trillingssnelheden in het midden van de vloeren.

Overdrachtsfactoren fundering naar vloeren

De gelijktijdigheid van de gemeten druk- en vloertrillingssignalen beschreven in de vorige paragraaf sluit niet uit dat het grondpad of het lucht-grondpad een bijdrage leveren aan de vloertrillingen. In deze paragraaf wordt daarom op basis van aanvullende analyse van de gebouwmetingen onderbouwd dat het grondpad en het lucht-grondpad niet verantwoordelijk kunnen zijn voor de gemeten vloertrillingen in de onderzochte gebouwen.

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de gemeten maximum trillingssnelheden (PPV) nabij de fundering en op de vloeren van woning 1 bij verschillende knallen op het ASK (de nummering van de knallen komt overeen met die in bijlage 10.8 van TNO 2016 R11226 [1]). Er zijn trillingsniveaus gespecificeerd die zijn gemeten door sensoren op de begane grond vloer (sensor S10), en op de vloeren in twee ruimtes op de 1^e verdieping (sensoren S11 en S12). Foto's van de sensorposities zijn hieronder te zien.

Ten eerste blijkt uit onderstaande tabel dat de trillingsniveaus gemeten op de fundering (V1) vaak kleiner dan 0,2 mm/s zijn geweest, wat het gevolg is van het trigger niveau van 0,2 mm/s dat is gehanteerd voor de Vibra sensor. Verder is te zien dat de PPV waarden op de vloeren veel hoger zijn dan de gemeten waarden op de fundering. De sensor op de begane grond vloer (S10) en één van de sensoren op de 1^e verdieping (S12) geven tot een factor 11,5 hogere waarden dan het niveau gemeten op de fundering (V1). Voor de sensor S11 op de 1^e verdieping worden waarden kleiner dan 1 gevonden. De reden hiervoor is dat de vloer waarop sensor S11 was geplaatst wordt ondersteund door een muur op de begane grond. Deze muur is te zien in hierboven weergegeven plattegrond van de begane grond met de sensorposities.

Trillingssnelheden gemeten op de fundering en de vloeren van woning 1 voor verschillende knallen.

Knal	Fund., PPV [mm/s]	Vloer, PPV [mm/s]			Verhouding PPV Vloer/Fundering [-]		
	Sensor V1	Sensor S10	Sensor S11	Sensor S12	S10/V1	S11/V1	S12/V1
2 (18 kg)	$\leq 0,2$	0,86	0,11	1,37	$\geq 4,3$	$\geq 0,5$	$\geq 6,8$
5 (18 kg)	0,21	1,25	0,12	2,16	6,0	0,6	10,3
13 (9 kg)	$\leq 0,2$	2,17	0,18	2,31	$\geq 10,8$	$\geq 0,9$	$\geq 11,5$
17 (9 kg)	$\leq 0,2$	2,10	0,15	1,76	$\geq 10,5$	$\geq 0,8$	$\geq 8,8$
20 (18 kg ing.)	$\leq 0,2$	0,66	0,08	0,78	$\geq 3,3$	$\geq 0,4$	$\geq 3,9$



Sensorposities S10, S11 en S12 op de vloeren van woning 1.

Als de trillingen in de vloer het gevolg zouden zijn van opslingeren van het gebouw door aanstoting van de fundering via de grond (dus via het grondpad of het lucht-grondpad), dan zouden lagere overdrachten van de fundering naar de vloeren zijn gevonden. Waarden voor de overdracht van fundering naar de vloeren van een gebouw voor kortdurende trillingen die worden gespecificeerd in literatuur zijn 1,3 volgens BS 6472-2:2008 [3] en 1,4 volgens van Staaldunen et al. [4].

In aanvulling 2 zijn de resultaten van de 4 onderzochte gebouwen gegeven. Voor alle 4 gebouwen worden overdrachtsfactoren gevonden die duidelijk hoger zijn dan volgens literatuur te verwachten is voor aanstoting via de grond. Op basis hiervan wordt geconcludeerd dat het grondpad en het lucht-grondpad niet verantwoordelijk kunnen zijn geweest voor de hoge trillingsniveaus gemeten op de vloeren van de 4 gebouwen.

Invloed grondtrillingen hinder andere gebouwen

In de vorige paragrafen is bewijslast aangeleverd waaruit blijkt dat voor de 4 onderzochte gebouwen in TNO 2016 R11226 [1] het luchtpad het dominante pad is. Het is echter mogelijk dat voor gebouwen die zich op kleinere afstand tot het ASK bevinden, de invloed van het grondpad en/of lucht-grondpad wel van belang is. Voor de 4 bemeeten gebouwen wordt in deze paragraaf aangetoond voor de 18 kg TNT lading dat het luchtpad nog steeds dominant is ten opzichte van het grondpad en/of lucht-grondpad, wanneer deze gebouwen dichterbij het ASK zouden staan.

Hiertoe worden eerst in paragraaf 3.1 de lijnen voor de 4 gebouwen van $V_{eff,max}$ tegen de geluidsdruk (SEL [dB]) afgeleid uit de metingen (TNO 2016 R11226 [1]) genomen en voor de 18 kg lading omgezet naar lijnen van $V_{eff,max}$ tegen de afstand tot het punt van detonatie. In paragraaf 3.2 wordt op basis van conservatieve relaties uit de literatuur voor het grondpad en lucht-grondpad een relatie afgeleid voor vloertrillingen tegen de afstand voor een 18 kg lading. In paragraaf 3.3 worden deze resultaten gecombineerd en $V_{eff,max}$ versus afstand uit de metingen voor het luchtpad vergeleken met de relaties uit de literatuur voor het grondpad en luch-grondpad waaruit volgt dat als deze woningen dichterbij het ASK zouden liggen het luchtpad nog altijd dominant is.

Afleiding grafieken $V_{eff,max}$ versus afstand tot detonatie van de 18 kg TNT lading voor de 4 gebouwen

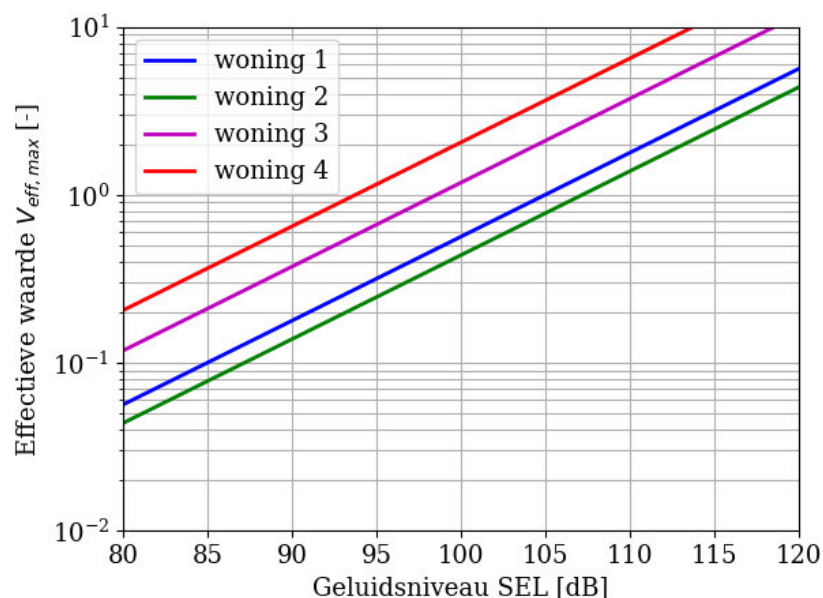
In notitie bijlage 5 zijn 90% interval (10% overschrijdingskans) lijnen afgeleid voor $V_{eff,max}$ op vloeren als functie van de geluidsdruk in dB op basis van de metingen in 4 woningen beschreven in TNO 2016 R11226 [1]. De lijnen voor de vloeren met de hoogste trillingsniveaus voor de vier woningen zijn samen weergegeven in onderstaande figuur (a). Voor een lading van 18 kg TNT is de luchtdruk als functie van de afstand tot het punt van detonatie bepaald via berekeningen, zie figuur (b). De combinatie met figuur (a) leidt voor de 18 kg lading tot een relatie tussen $V_{eff,max}$ en de afstand tot het punt van detonatie voor de 4 bemeeten woningen. Figuur (c) toont het resultaat.

$V_{eff,max}$ als functie van de afstand voor het grondpad en lucht-grondpad

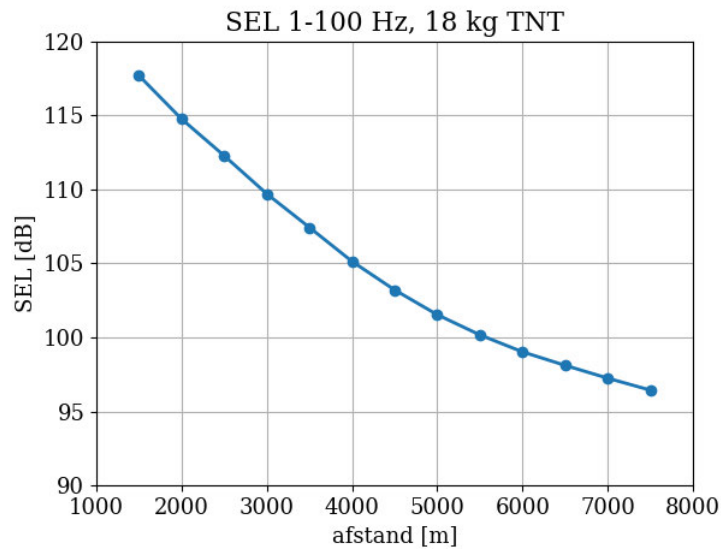
In deze paragraaf wordt een inschatting gemaakt van de trillingsniveaus $V_{eff,max}$ op de vloeren van gebouwen rond het ASK, behorende bij het grondpad en het lucht-grondpad. De trillingsniveaus $V_{eff,max}$ kunnen worden bepaald met:

$$V_{eff,max} = PGV \cdot C_{grond-vloer} \cdot C_{V_{eff,max}/PPV} \quad (1)$$

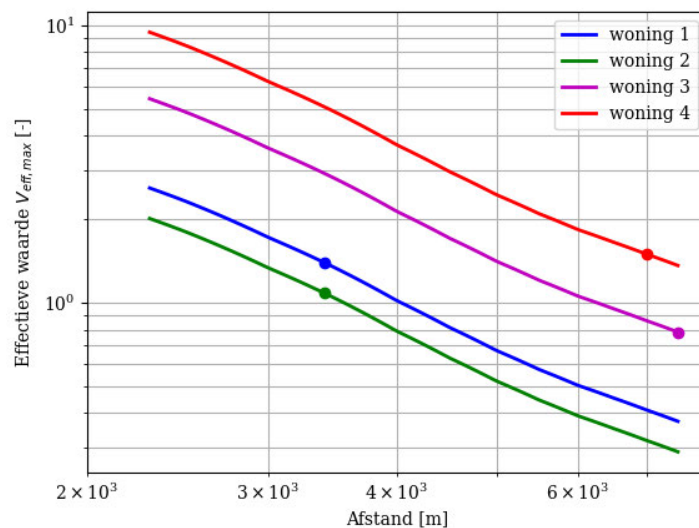
Hierin is PGV de Peak Ground Velocity, waarvoor in bijlage 1 zes relaties zijn gegeven die deze trillingsnelheid als functie van de afstand tussen de bronlocatie en een gebouw beschrijven.



(a) $V_{eff,max}$ tegen geluidsdruk voor de 4 woningen. Lijnen geven het 90% interval weer (10% overschrijdingskans).



(b) Geluidsdruk SEL als functie van de afstand voor 18 kg lading.

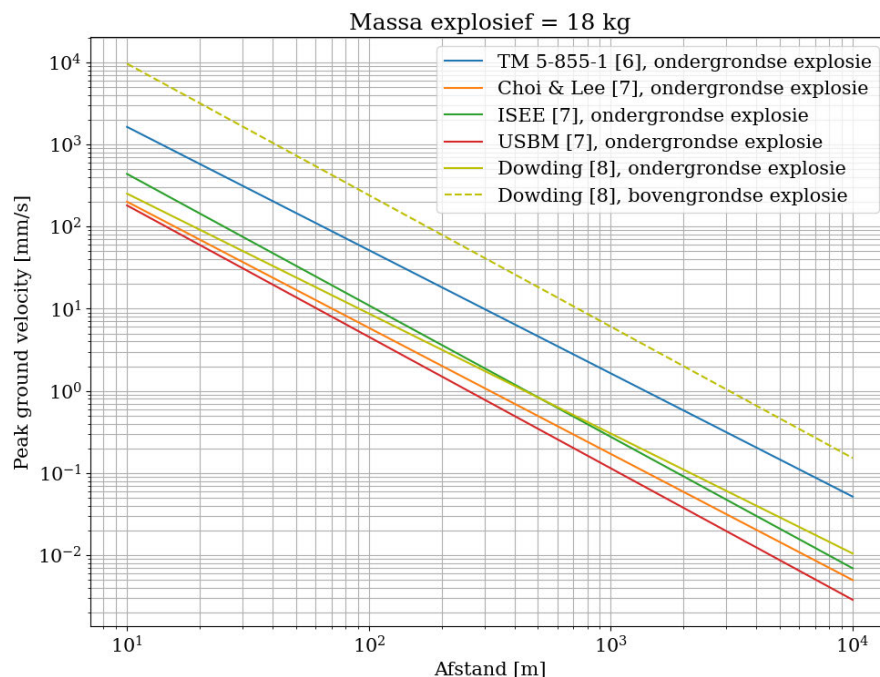
(c) $V_{eff,max}$ versus afstand tot het detonatiepunt van 18 kg TNT voor de vier woningen op basis van het luchtpad. De markers geven de feitelijke locatie van de woningen aan.

De factor $C_{grond-vloer}$ beschrijft de overdracht van trillingen van de grond naar een vloer. Met behulp van de waarden die in literatuur zijn gegeven voor de overdracht van de fundering naar de vloeren van een gebouw voor kortdurende trillingen, kan een inschatting worden gemaakt van de Peak Particle Velocity (PPV) op de vloeren. Er wordt hier uitgegaan van de hoogste van de twee waarden gevonden in literatuur, 1,3 volgens de British Standard, BS 6472-2:2008 [3], en i.e. 1,4 volgens van Staalduinen et al. [4]. Hierna wordt de waarde 1,4 gehanteerd. Als funderingstrilling wordt conservatief de trilling in de bodem (PGV) aangenomen.

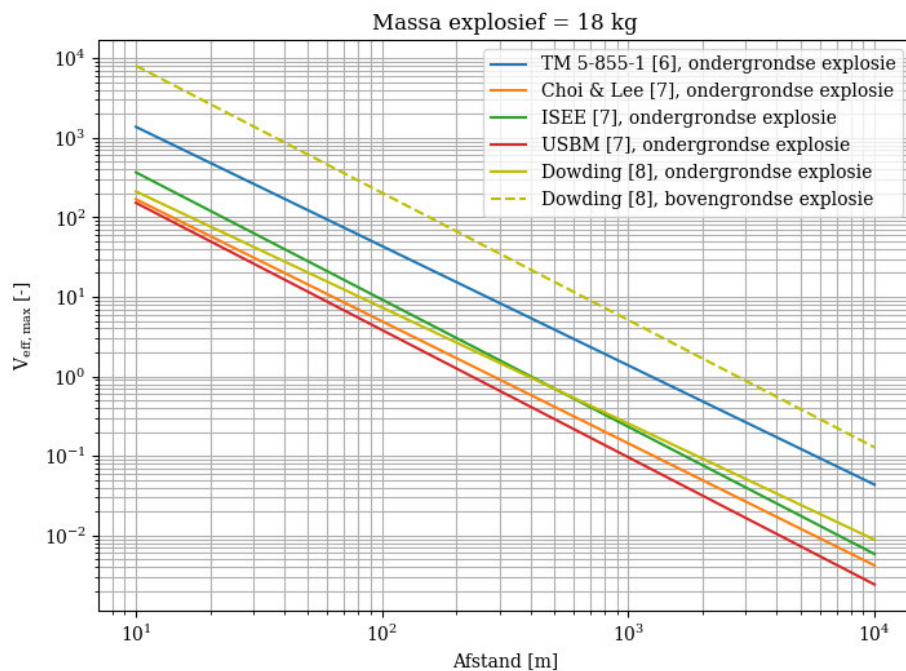
De factor $C_{V_{eff,max}/PPV}$ beschrijft de verhouding tussen de PPV en $V_{eff,max}$ op een vloer. Hiervoor is een conservatieve waarde bepaald, $C_{V_{eff,max}/PPV} = 0,6$. In Bijlage C is toegelicht hoe deze waarde voor $C_{V_{eff,max}/PPV}$ is afgeleid. Op basis van de waarden bepaald voor de overdracht van trillingen van de grond naar een vloer en de verhouding tussen de PPV en $V_{eff,max}$ op een vloer volgt:

$$V_{eff,max} = PGV \cdot 0,84 \quad (2)$$

In de twee onderstaande figuren zijn voor een 18 kg lading de PGV waarden en de $V_{eff,max}$ waarden verkregen met de zes empirische relaties weergegeven. Voor ondergrondse explosies geeft TM 5-855-1 [5] beduidend hogere waarden dan de andere vier relaties voor ondergrondse explosies. Voor bovengrondse explosies geeft de relatie van Dowding de hoogste waarden.



PGV als functie van afstand voor de verschillende relaties voor ondergronds explosies (grondpad) en bovengrondse explosies (grondpad en lucht-grondpad).

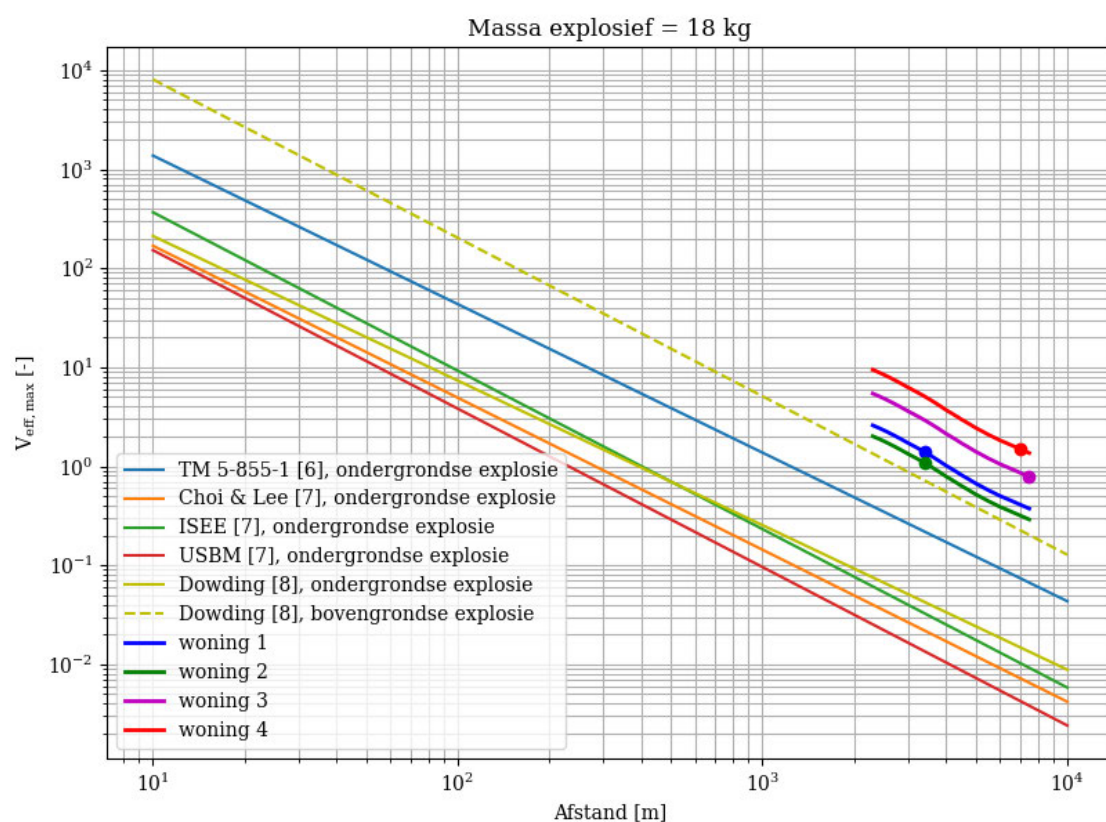


$V_{eff,max}$ als functie van afstand voor de verschillende relaties voor ondergronds explosies (grondpad) en bovengrondse explosies (grondpad en lucht-grondpad).

Vergelijking luchtpad met grondpad en grond-luchtpad voor 18 kg TNT

Om het luchtpad te vergelijken met het grondpad en grond-luchtpad zijn de twee bovenstaande figuren samengevoegd in onderstaande figuur. Hieruit volgt dat voor alle woningen de $V_{eff,max}$ waarden voor het luchtpad hoger liggen dan die bepaald met de meest conservatieve relatie uit de literatuur: Dowding [8] voor bovengrondse explosie. Om te bepalen hoe conservatief deze relatie van Dowding is, is een steekproef genomen door de funderingstrilling gemeten in woning 1 en 2 bij een 18 kg detonatie te vergelijken met de PGV (de bovenste lijn in Figuur 3.4 op een afstand van 3,4 km). Deze PGV waarden van Dowding zijn ca. een factor 4 hoger dan de hoogst gemeten funderingstrilling bij woning 1 (PGV = 0,21 mm/s) en woning 2 (PGV = 0,25). De meest ongunstige relatie voor ondergrondse explosies, TM 5-855-1 [5], ligt ook nog een factor 2 hoger dan de gemeten funderingstrillingen. Deze relaties geven inderdaad conservatieve inschattingen voor de PGV.

Uit deze analyse volgt dat het luchtpad nog altijd bepalend is zouden de 4 woningen op een andere afstand tot het ASK staan.



$V_{eff,max}$ als functie van de afstand voor de verschillende relaties voor ondergrondse explosies (grondpad) en bovengrondse explosies (grondpad en lucht-grondpad) samen met de luchtpad relaties volgend uit de metingen voor de 4 woningen.

Conclusie

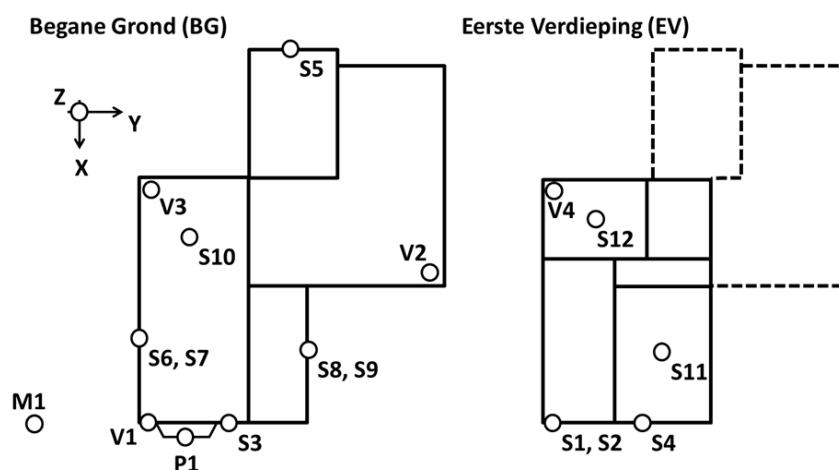
Een belangrijk uitgangspunt bij de beoordeling van trillinghinder in gebouwen rond het ASK is dat de trillingen op vloeren ten gevolge van explosies op het ASK door geluidsdrukgolven via de lucht worden veroorzaakt (het luchtpad) en dat de overdracht door de grond (via het grondpad of het lucht-grondpad) niet bepalend is.

In deze notitie is op basis van een aanvullende analyse van de metingen uitgevoerd aan 4 gebouwen rond het ASK bewijslast geleverd die dit uitgangspunt onderbouwt. De drie voornaamste conclusies zijn:

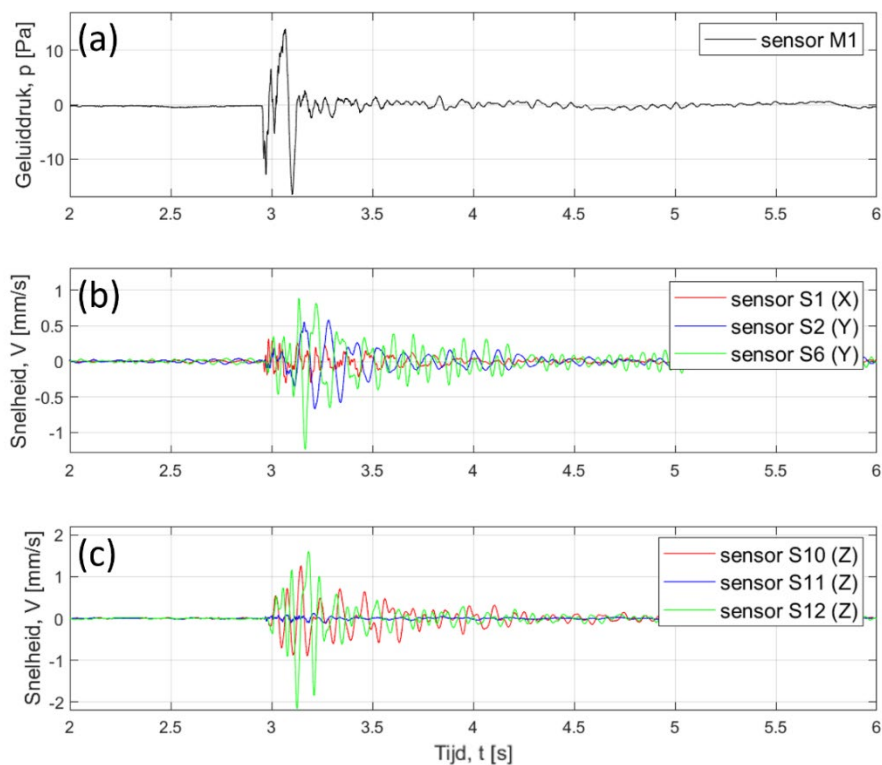
- De gemeten signalen op de vloeren van alle woningen treden gelijktijdig op met de gemeten geluidsdruksignalen bij die woningen;
- De trillingsniveaus op vloeren zijn in alle woningen veel groter dan de waarden die in literatuur worden gegeven, zou een fundering-vloer overdracht het mechanisme zijn;
- Conservatieve relaties uit de literatuur voor het grondpad en lucht-grondpad leiden tot duidelijk lagere trillingsniveaus op vloeren dan gemeten. Ook in het geval van extrapolatie van de locaties van de 4 bemeeten woningen naar afstanden dichterbij het ASK.

Hoewel de 4 bemeeten gebouwen zeer verschillend zijn, is niet volledig uit te sluiten dat voor andere gebouwtypen het grondpad en lucht-grondpad wel een dominante bijdrage kan hebben. Het wordt aanbevolen om in de meetcampagne ook sensoren in de bodem te positioneren om de relaties uit de literatuur voor het grondpad en lucht-grondpad te kalibreren voor ingegraven en niet ingegraven lading. De bodemtrilling nabij een gebouw kan ook gebruikt worden om de gebruikte opslingerfactor van 1,4 van fundering naar vloer te verifiëren. Om dit laatste te kunnen doen dient ook de eigenfrequentie van de vloeren waarop gemeten wordt, bepaald te worden via lokale excitatie (bv. door middel van een hielvalproef).

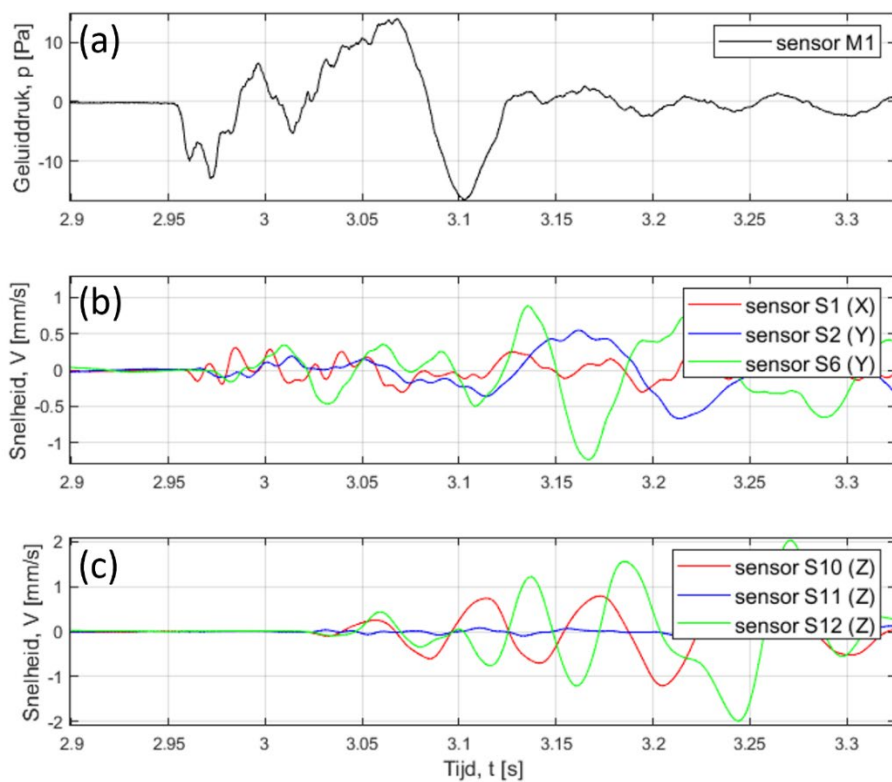
Aanvulling 1: Tijdsignalen geregistreerd bij woningen rond het ASK



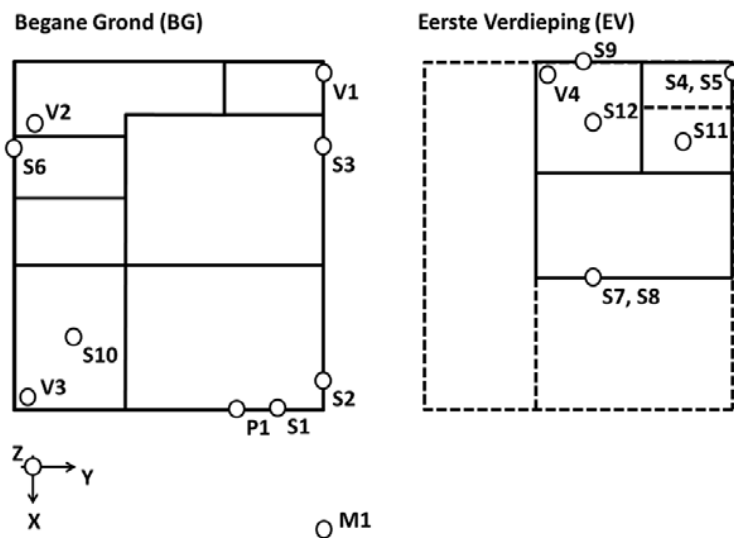
Sensorposities weergegeven op plattegrond woning 1.



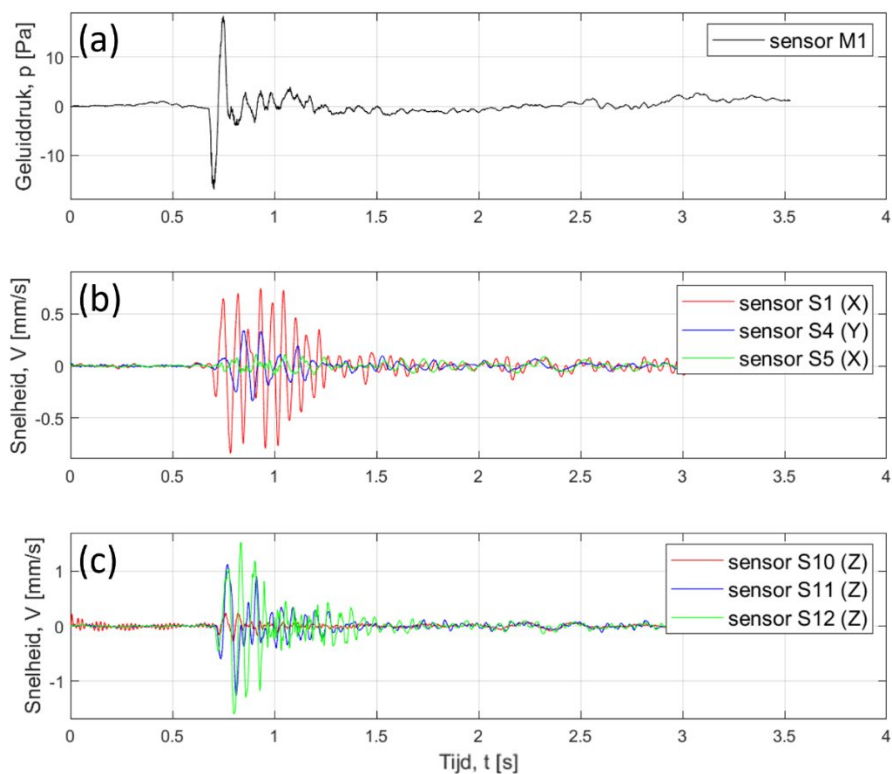
Signalen gemeten aan woning 1 na het ruimen van een lading van 15 kg (knaal 6).



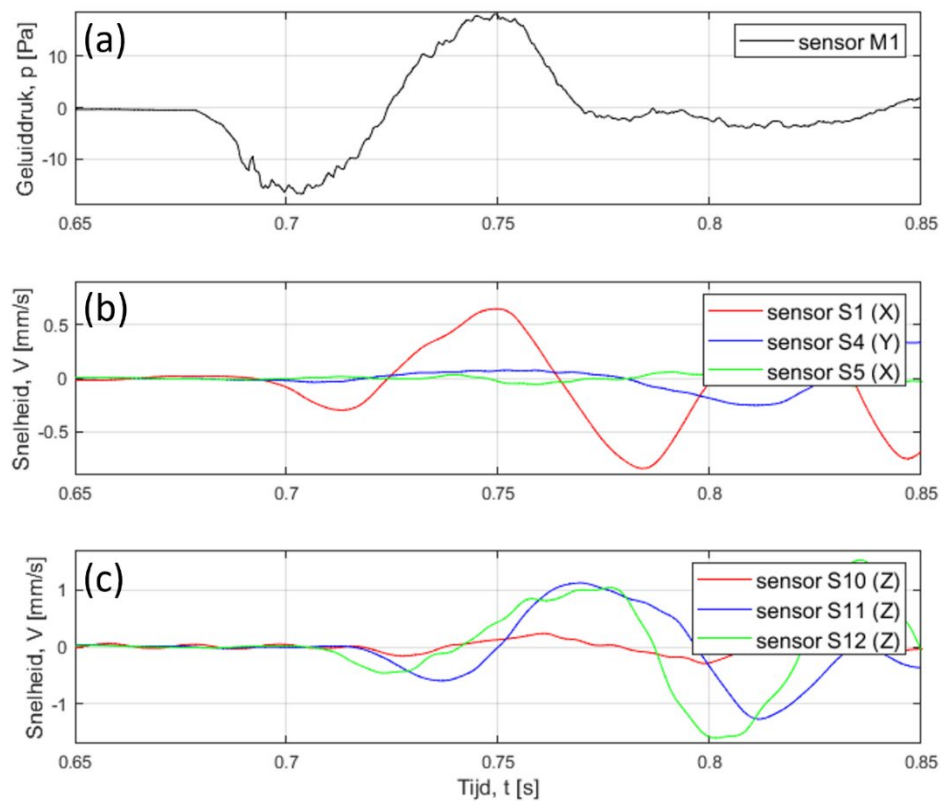
Detail (seconde 2,9 tot 3,3) van signalen gemeten aan woning 1 na het ruimen van 15 kg (knaal 6).



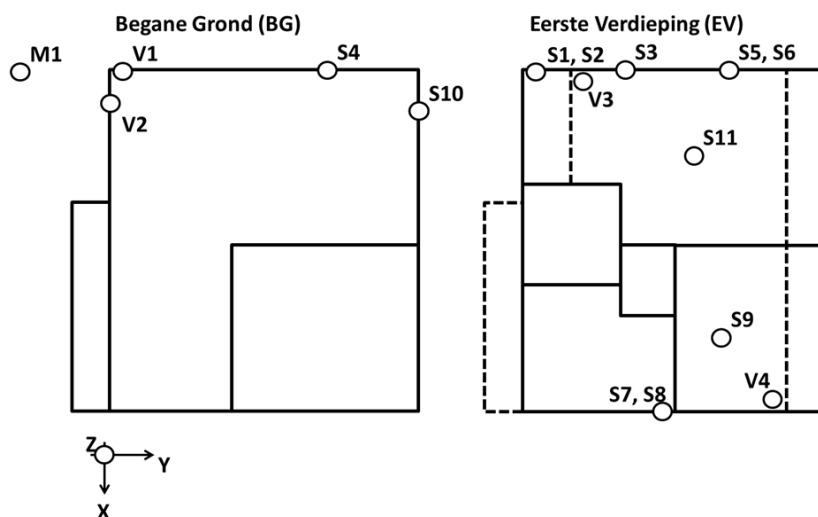
Sensorposities weergegeven op plattegrond woning 2.



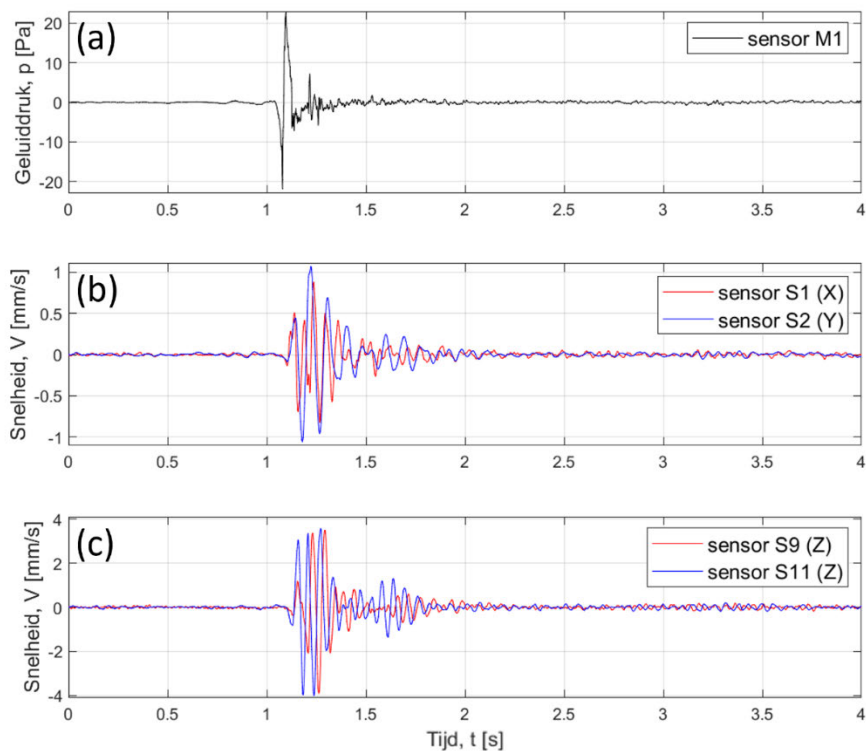
Signalen gemeten aan woning 2 na het ruimen van een lading van 18 kg (knaal 5).



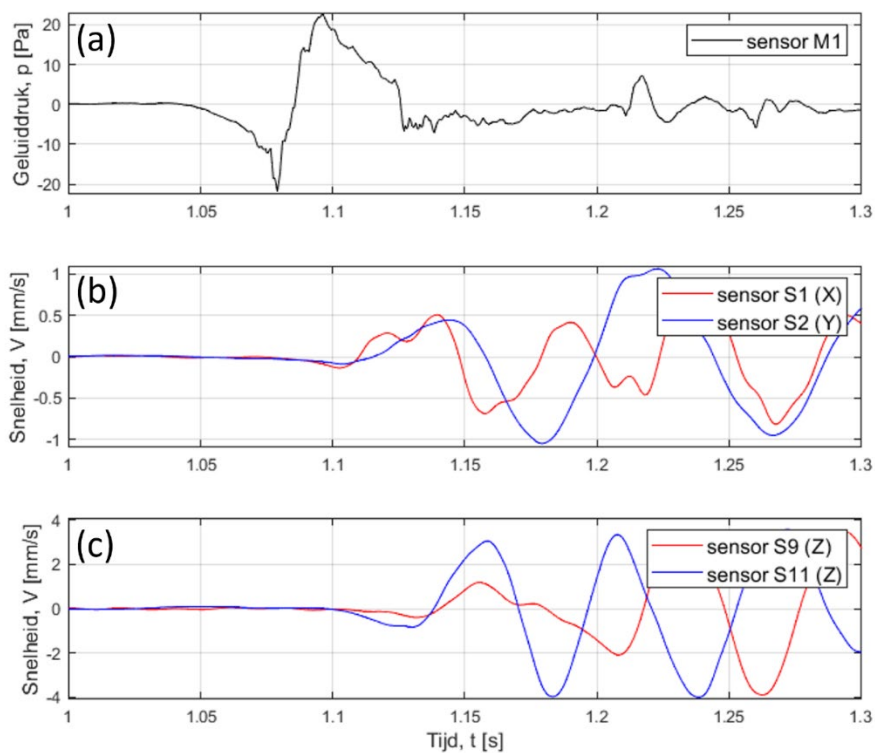
Detail (seconde 0,65 tot 0,85) van signalen gemeten aan woning 2 na het ruimen van een lading van 18 kg (knaal 5).



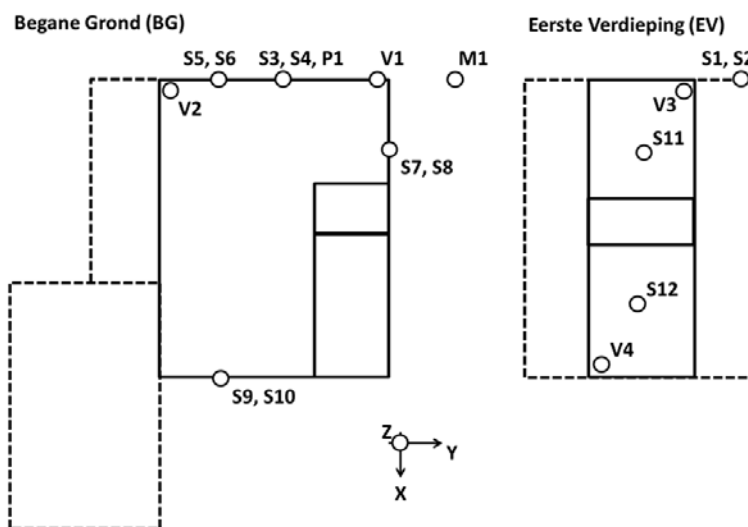
Sensorposities weergegeven op plattegrond woning 3.



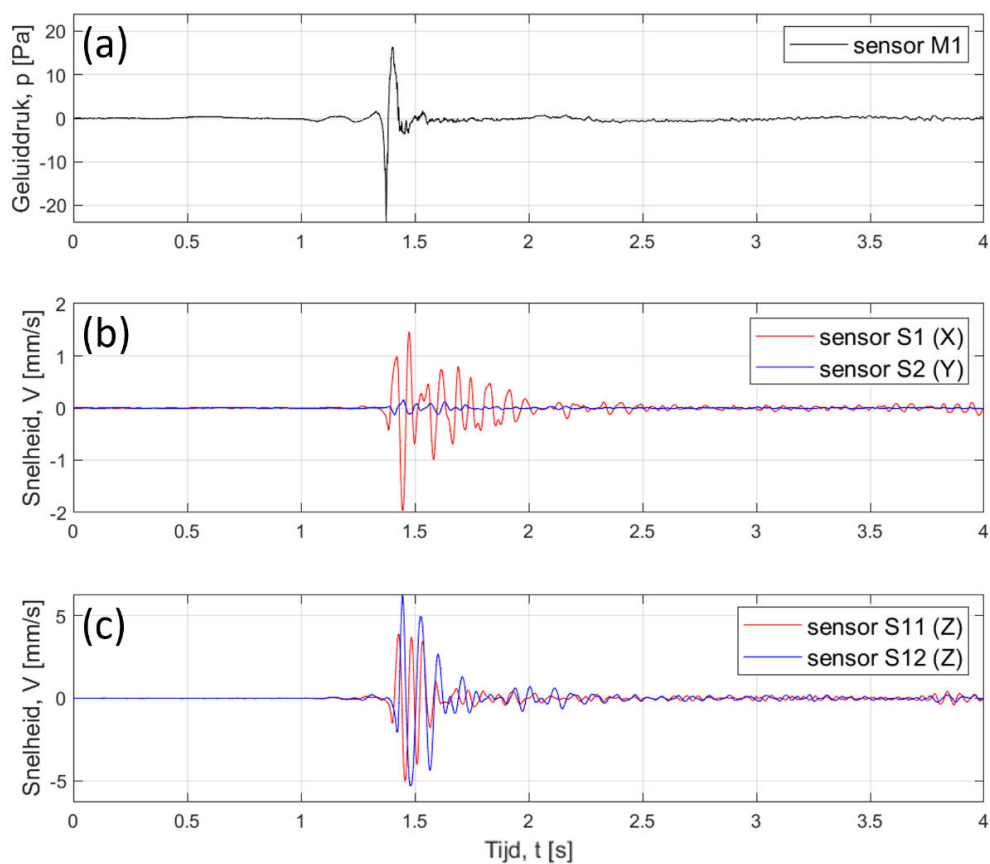
Signalen gemeten aan woning 3 na het ruimen van een lading van 15 kg (knaal 6).



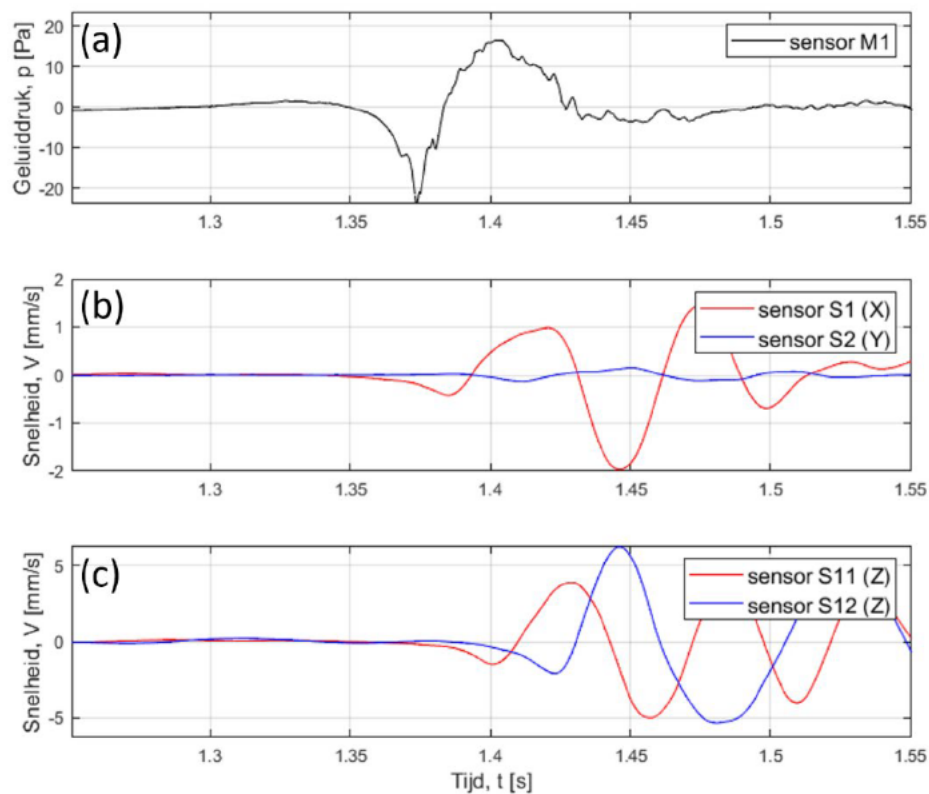
Detail (seconde 1,0 tot 1,3) van signalen gemeten aan woning na het ruimen van een lading van 15 kg (knaal 6).



Sensorposities weergegeven op plattegrond woning 4.



Signalen gemeten aan woning 4 na het ruimen van een lading van 18 kg (knal 4).



Detail (seconde 1,25 tot 1,55) van signalen gemeten aan woning 4 na het ruimen van een lading van 18 kg (knaal 4).

Aanvulling 2: Verhouding trillingen fundering en vloeren woningen 1 t/m 4

Trillingssnelheden *PPV* gemeten op de fundering en de vloeren van woning 1 voor verschillende knallen.

Knaal	Fundering	Vloer			Verhouding Vloer/Fundering		
	Sensor V1	Sensor S10	Sensor S11	Sensor S12	S10/V1	S11/V1	S12/V1
2 (18 kg)	$\leq 0,2$	0,86	0,11	1,37	$\geq 4,3$	$\geq 0,5$	$\geq 6,8$
5 (18 kg)	0,21	1,25	0,12	2,16	6,0	0,6	10,3
13 (9 kg)	$\leq 0,2$	2,17	0,18	2,31	$\geq 10,8$	$\geq 0,9$	$\geq 11,5$
17 (9 kg)	$\leq 0,2$	2,10	0,15	1,76	$\geq 10,5$	$\geq 0,8$	$\geq 8,8$
20 (18 kg ing.)	$\leq 0,2$	0,66	0,08	0,78	$\geq 3,3$	$\geq 0,4$	$\geq 3,9$

Trillingssnelheden *PPV* gemeten op de fundering en de vloeren van woning 2 voor verschillende knallen.

Knal	Fundering	Vloer			Verhouding Vloer/Fundering		
	Sensor V1	Sensor S10	Sensor S11	Sensor S12	S10/V1	S11/V1	S12/V1
7 (15 kg)	0,25	0,43	1,51	2,61	1,7	6,1	10,4
8 (15 kg)	0,23	0,38	1,54	2,75	1,6	6,7	12,0
12 (12 kg)	≤ 0,2	0,24	1,32	1,20	≥ 1,2	≥ 6,6	≥ 6,0
16 (9 kg)	≤ 0,2	0,27	1,47	1,33	≥ 1,3	≥ 7,3	≥ 6,6
20 (18 kg ing.)	≤ 0,2	0,34	1,37	1,30	≥ 1,7	≥ 6,8	≥ 6,5

Trillingssnelheden *PPV* gemeten op de fundering en de vloeren van woning 3 voor verschillende knallen.

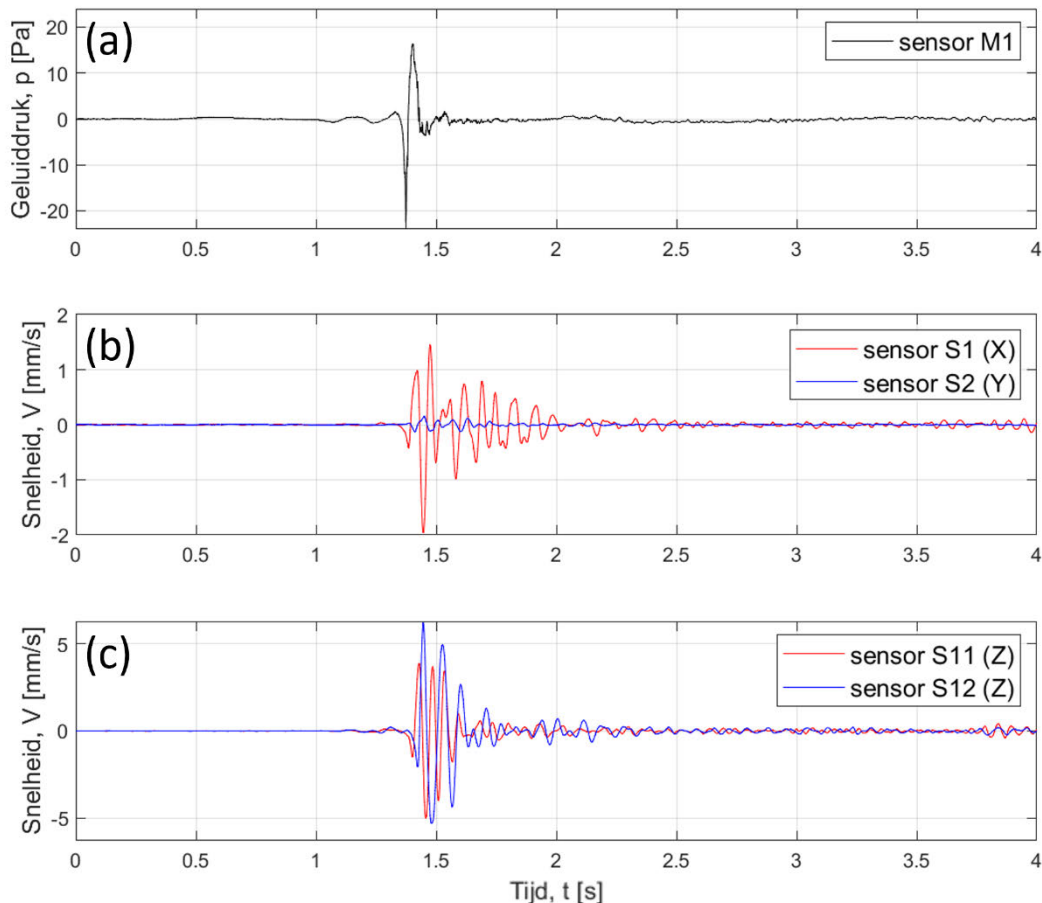
Knal	Fundering	Vloer			Verhouding Vloer/Fundering		
	Sensor V1	Sensor S9	Sensor S11	-	S9/V1	S11/V1	-
1 (18 kg)	0,52	4,53	4,25	-	8,7	8,2	-
3 (18 kg)	0,54	3,44	3,46	-	6,4	6,4	-
5 (18 kg)	0,47	3,23	3,12	-	6,9	6,6	-
8 (15 kg)	0,53	3,25	3,57	-	6,1	6,7	-
12 (9 kg)	0,21	1,77	1,72	-	8,4	8,2	-

Trillingssnelheden *PPV* gemeten op de fundering en de vloeren van woning 4 voor verschillende knallen.

Knal	Fundering	Vloer			Verhouding Vloer/Fundering		
	Sensor V1	Sensor S11	Sensor S12	-	S11/V1	S12/V1	-
1 (18 kg)	≤ 0,2	4,25	4,87	-	21,2	24,3	-
3 (18 kg)	≤ 0,2	5,42	6,83	-	27,1	34,2	-
6 (15 kg)	≤ 0,2	7,49	7,46	-	37,4	37,3	-
10 (12 kg)	≤ 0,2	1,68	2,73	-	8,4	13,6	-
14 (9 kg)	≤ 0,2	1,46	1,76	-	7,3	8,8	-

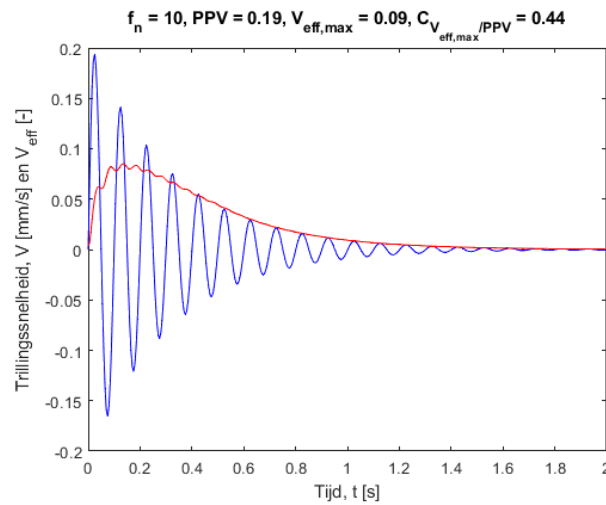
Aanvulling 3: Bepaling verhouding $V_{eff,max}$ en PPV

In deze aanvulling wordt beschreven hoe de conservatieve waarde $C_{V_{eff,max}/PPV} = 0,6$ is bepaald. Op basis van de gemeten vloertrillingssignalen weergegeven in aanvulling 1 wordt geconcludeerd dat deze beschreven kunnen worden met een gedempte trilling, zoals weergegeven in met de blauwe lijn in onderstaande figuur uit aanvulling 1. Deze trilling is enkel een functie van de eigenfrequentie en demping van de vloer.

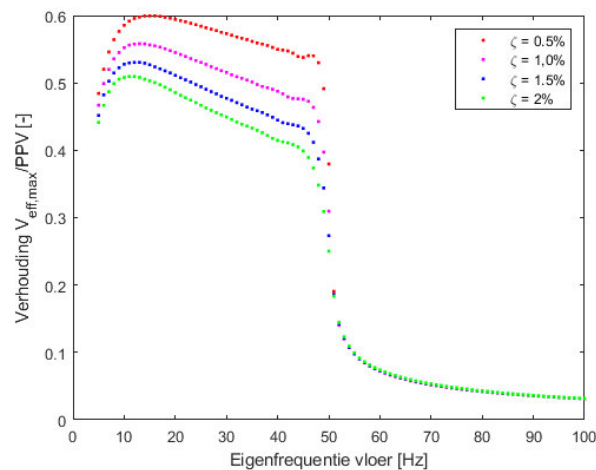


Signalen gemeten aan woning 4 na het ruimen van een lading van 18 kg (knaal 4).

Voor dit signaal is een V_{eff} signaal bepaald volgens SBR B, dit signaal is ook weergegeven met de rode lijn in onderstaande figuur. De verhouding van $V_{eff,max}$ en PPV van deze signalen geeft een waarde voor $C_{V_{eff,max}/PPV}$ voor de gebruikte eigenfrequentie en demping. In onderstaande figuur (a) zijn deze waarden $f_n = 10$ Hz en $\zeta = 5\%$. De verhouding kan vervolgens worden bepaald voor verschillende eigenfrequenties en dempingswaarden. ; het resultaat hiervan is weergegeven in figuur (b) hieronder. Hierbij zijn conservatieve ranges gehanteerd voor de eigenfrequenties en dempingwaarden. In figuur (b) is te zien dat $C_{V_{eff,max}/PPV} = 0,6$ een conservatieve waarde is voor de onderzochte eigenfrequenties en dempingswaarden. In de metingen aan de vloeren van de 4 woningen zijn maximum waarden over alle explosies gevonden variërend tussen 0,41 en 0,54, dus ook hiervoor is 0,6 een conservatieve waarde.



(a) Gesimuleerde gedempte trilling voor vloer met eigenfrequentie van $f_n = 10$ Hz en demping van $\zeta = 5\%$.



(b) Verhoudingsfactor $C_{V_{eff,max}}/PPV$ als functie van de eigenfrequentie f_n en demping ζ .

Referenties

- [1] Bronkhorst, A.J., van der Eerden, F.J.M., Trillingsmetingen bij het Artillerie Schietkamp te Oldebroek: Toetsing op hinder en schade van woningen in de omgeving, TNO 2016 R11226, Den Haag, 2016.
- [2] ILT, (Ontwerp)beschikking, Weigering aanvraag Revisievergunning Artillerie Schietkamp (ASK), 2023/1530, Den Haag, 2023.
- [3] BSI, BS 6472-2:2008, Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings – Part 2: Blast-induced vibration, 2008.
- [4] Staalduinen, P.C., Smits, M.H.Th.J., Waarts, P.H., 1991, Trillingsonderzoek ten behoeve van het handboek damwanden, B-91-0705, TNO Bouw.
- [5] Department of the Army Technical Manual TM 5-855-1, 1985, Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons, Washington DC.
- [6] Choi, S., Lee, S., 2021, Predictive Modelling for Blasting-Induced Vibrations from Open-Pit Excavations, Appl. Sciences, 11, 7487.
- [7] Dowding, C.H., 1996, Construction vibrations, Upper Saddle River, NJ Prentice-Hall.

BIJLAGE 5

Beoordelingsmethode trillinghinder op basis van geluiddruk

Inleiding

Rapport TNO 2016 R11226 [1] beoordeelt trillinghinder ten gevolge van schietoefeningen met verschillende wapentypes op het ASK op basis van de relatie tussen het geluidexpositieniveau L_x en de trillingsnelheid $V_{eff,max}$. Hierbij wordt uitgegaan van de L_x - $V_{eff,max}$ relaties welke zijn bepaald uit de metingen aan de 4 gebouwen beschreven in rapport TNO 2016 R11226 [1]. ILT stelt in de ontwerpbeschikking [2]:

1. Dat niet duidelijk is gemaakt waarom de in 2016 uitgevoerde metingen [1] nog steeds actueel zijn.
2. Dat onvoldoende vast staat dat de hoogste trillingsniveaus optreden in de 4 onderzochte gebouwen.

In deze notitie wordt eerst ingegaan op de vraag in hoeverre de uitgevoerde metingen en resultaten uit dit onderzoek nog actueel zijn en gebruikt kunnen worden in de beoordeling van trillinghinder voor de vergunningaanvraag van het ASK. Hierna wordt toegelicht hoe de 4 onderzochte gebouwen zijn geselecteerd, en wordt onderbouwd waarom deze gebouwen een goede weergave zijn van de trillingsgevoelige gebouwen rond het ASK. Vervolgens wordt een overzicht gemaakt van de L_x - $V_{eff,max}$ relaties, bepaald op basis van de trillingsmetingen uitgevoerd op alle vloeren in de 4 onderzochte gebouwen. Met behulp van deze relaties wordt een maatgevende L_x - $V_{eff,max}$ relatie voor alle gebouwen rond het ASK bepaald. Deze notitie sluit af met conclusies en aanbevelingen met betrekking tot deze maatgevende relatie.

Bruikbaarheid metingen beoordeling trillinghinder

Selectie van de gebouwen voor metingen

De gebouwmetingen beschreven in rapport TNO 2016 R11226 [1] zijn uitgevoerd in 2016. TNO ziet geen reden waarom de resultaten van deze metingen niet van toepassing zouden zijn voor de huidige situatie. Ten eerste zijn de wapentypes waarmee explosies zijn geproduceerd, tijdens de metingen aan de 4 gebouwen, nog steeds de belangrijkste soorten wapens waar schietoefeningen mee worden gedaan op het ASK. De geluidsdrukkniveaus voor wapentypes waarvoor geen metingen zijn uitgevoerd (bv. 120 mm mortier HE), kunnen rekenkundig worden bepaald. Met behulp van de L_x - $V_{eff,max}$ relaties kunnen de $V_{eff,max}$ waarden op de vloeren van de onderzochte gebouwen worden bepaald, en kan een beoordeling worden gemaakt van trillinghinder in deze gebouwen. Eventueel kunnen aanvullende metingen worden uitgevoerd met deze wapentypes ter verificatie van de berekeningen.

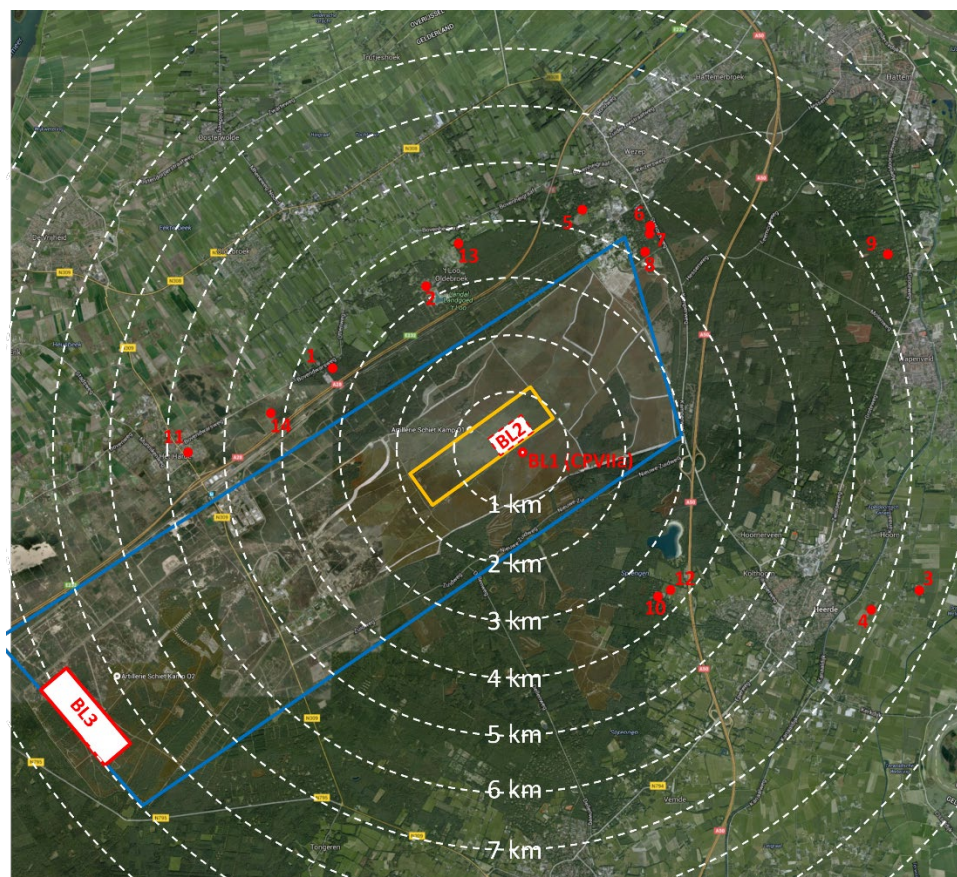
Ten tweede bestaan de onderzochte gebouwen nog steeds, en de constructie van deze woningen is niet wezenlijk veranderd. Er is geen reden om aan te nemen dat nieuwe metingen aan deze woningen in andere bevindingen zouden resulteren. Daarnaast wordt in deze notitie op basis van een analyse van de eigenschappen van de gebouwen en van de resultaten van de metingen aan de vloeren van de 4 gebouwen een L_x - $V_{eff,max}$ relatie afgeleid voor een maatgevende vloer voor gebouwen rond het ASK (zie paragraaf 4). Het is daarmee niet meer wezenlijk van belang of de onderzochte gebouwen nog steeds bestaan of een constructieve verandering hebben ondergaan.

Ten derde is de SBR B richtlijn [3] volgens welke de metingen zijn uitgevoerd nog steeds van toepassing. Dus ook vanuit dat oogpunt zijn de metingen uitgevoerd in 2016 actueel, en kunnen de resultaten van deze metingen gebruikt worden bij de beoordeling van trillinghinder in gebouwen rond het ASK.

Representativiteit voor hinder gebouwen rond ASK

De 4 onderzochte gebouwen zijn geselecteerd op basis van de klachteninventarisatie, de bereidheid en beschikbaarheid van eigenaars tot deelname, de weersomstandigheden, de afstand tot de bronlocaties, en de verwachte trillingsgevoeligheid van de gebouwen op basis van de beschikbare informatie over de bouwkundige opbouw. Voor de beoordeling van trillinghinder in alle gebouwen rond het ASK is vooral de representativiteit van de bouwkundige opbouw van de onderzochte gebouwen voor andere gebouwen rond het ASK van belang.

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de gebouwen uit de klachteninventarisatie waarvan de bewoners trillingen of (angst voor) trillingsschade hebben benoemd in hun klacht. Uit dit overzicht blijkt dat trillinghinder vooral wordt ervaren in vrijstaande metselwerk gebouwen met 2 bouwlagen (bouwlaagdefinitie volgens NEN 2580). Opvallend is dat op grotere afstanden (vanaf ~5 km), bewoners van gebouwen met enkelsteens muren relatief vaker klachten hebben ingediend dan bewoners van gebouwen met spouwmuren. Onbekend is of er op afstanden kleiner dan 5 km minder gebouwen met enkelsteensmuren voorkomen. Het relatief grotere aantal klachten van gebouwen met enkelsteens-muren op afstanden groter dan 5 km is een indicatie dat gebouwen met een enkelsteensmuur een grotere gevoeligheid voor trillingen door geluiddruk hebben. Dit wordt ook onderbouwd door het gebouw met enkelsteensmuren op 10,9 km afstand aan de Esschertsweg 13; er is geen ander gebouw op dusdanig grote afstand waar trillinghinder is gemeld. Uit **Error! Reference source not found.** komt niet duidelijk naar voren dat de dakbedekking van invloed is op de ervaren trillinghinder.



Locaties van de 14 geselecteerde gebouwen.

De 4 onderzochte gebouwen zijn dik- en schuingedrukt weergegeven in onderstaande tabel. Te zien is dat deze gebouwen qua bouwjaar, aantal bouwlagen, muur (spouwmuur of enkelsteensmuur) een goede weergave vormen van de gebouwen waar dusdanige trillinghinder is ervaren dat de bewoners hiervoor een klacht hebben ingediend. Ook voor de grotere set van gebouwen uit de klachteninventarisatie beschreven in bijlage A zijn de 4 onderzochte gebouwen op deze bouwkundige eigenschappen een goede weergave. Verder dekken de onderzochte gebouwen ook de twee meest voorkomende dakbedekkingen (dakpannen en rieten daken) uit de klachteninventarisatie af. Ook wat betreft de staat van de constructie zijn er aanwijsbare verschillen tussen de 4 gebouwen. Het gebouw aan de Bovendarsweg 108 was in rapport TNO 2016 R11226 [1] als trillingsgevoelig gekwalificeerd, vanwege verschillende scheuren in de gevels. Bij de andere 3 onderzochte gebouwen is geen schade geconstateerd.

Er is geen informatie beschikbaar over het type vloer of de fundering van de gebouwen uit de klachteninventarisatie. De 4 onderzochte gebouwen hadden een fundering op staal. Aangezien de bodem rond het ASK voornamelijk uit zandgronden bestaat, zal het overgrote deel van de gebouwen rond het ASK dit type fundering hebben.

Voor wat betreft de opbouw van de vloeren zijn op basis van beschikbaar fotomateriaal en contact met de bewoners de volgende vloertypen bepaald:

- Bovendwarsweg 108 (woning 1 in [1])
 - o Vloer 1 (sensor S10), begane grond: Houten vloer
 - o Vloer 2 (sensor S11), 1^e verdieping: Houten vloer (in midden ondersteund door muur)
 - o Vloer 3 (sensor S12), 1^e verdieping: Houten vloer
- Vierschotenweg 46 (woning 2 in [2])
 - o Vloer 1 (sensor S10), begane grond: Betonnen vloer
 - o Vloer 2 (sensor S11), 1^e verdieping: Houten vloer
 - o Vloer 3 (sensor S12), 1^e verdieping: Houten vloer
- Plakkenweg 17 (woning 3 in [2])
 - o Vloer 1 (sensor S9), 1^e verdieping: Houten vloer
 - o Vloer 2 (sensor S11), 1^e verdieping: Houten vloer
- Assendorperstraat 2 (woning 4 in [2])
 - o Vloer 1 (sensor S11), 1^e verdieping: Houten vloer
 - o Vloer 2 (sensor S12), 1^e verdieping: Houten vloer

Overzicht van met informatie van gebouwen uit de klachteninventarisatie waar de bewoner expliciet een klacht heeft ingediend over trillingen, trillingsschade of angst voor trillingsschade.

Adres	Afstand [km]	Bouwjaar	Woning definitie	Aantal bouwlagen	Constructie	Muur	Dak bedekking
Harm Aartsweg 1	2,9	1932	Vrijstaand	-	-	-	Dakpannen
<i>Vierschotenweg 46</i>	<i>3,4</i>	<i>1954</i>	<i>Vrijstaand</i>	<i>2 lagen</i>	<i>Metselwerk</i>	<i>Spouwmuur</i>	<i>Dakpannen</i>
<i>Bovendwarsweg 108</i>	<i>3,4</i>	<i>1957</i>	<i>Vrijstaand</i>	<i>2 lagen</i>	<i>Metselwerk</i>	<i>Spouwmuur</i>	<i>Dakpannen</i>
Berkenlaan 11	3,5	2001	Vrijstaand	2 lagen	Metselwerk	Spouwmuur	Rieten dak
Eikenlaan 4	3,6	1996	Vrijstaand	2 lagen	Metselwerk	Spouwmuur	Dakpannen
Kamperweg 82	3,7	1980	Vrijstaand	3 lagen	-	-	Dakpannen
Eikenlaan 1	3,8	2004	Vrijstaand	2 lagen	Metselwerk	Spouwmuur	Rieten dak
Fazantenlaan 13	4,3	1978	Vrijstaand	2 lagen	Metselwerk	Spouwmuur	Dakpannen
Stationsweg 131	4,4	1961	Vrijstaand	2 lagen	Metselwerk	Spouwmuur	Bitumen
Stationsweg 121	4,5	1964	Vrijstaand	2 lagen	Metselwerk	Spouwmuur	Dakpannen
Horsthoekerbeek 12	4,9	1930	Vrijstaand	2 lagen	Metselwerk	Enkelsteens	Rieten dak
2e Hoornerveenseweg 18	4,9	2003	Vrijstaand	2 lagen	Metselwerk	Spouwmuur	Dakpannen
Kamperweg 3	5,2	1829	Vrijstaand	2 lagen	Metselwerk	Enkelsteens	Dakpannen
Bovendwarsweg 13	5,7	1975	Vrijstaand	2 lagen	Metselwerk	Spouwmuur	Dakpannen
Officiersweg 86	5,8	1970	Vrijstaand	2 lagen	Metselwerk	Spouwmuur	Bitumen
Elburgerweg 21	6,4	1954	Vrijstaand	2 lagen	Metselwerk	Spouwmuur	Dakpannen
Oude Elburgerweg 12	6,6	1976	Vrijstaand	2 lagen	Hout	-	Leien dak
<i>Assendorperstraat 2</i>	<i>6,7</i>	<i>1870</i>	<i>Vrijstaand</i>	<i>2 lagen</i>	<i>Metselwerk</i>	<i>Enkelsteens</i>	<i>Rieten dak</i>
Henk Cramerlaan 15	7,2	1959	Vrijstaand	-	-	-	-
<i>Plakkenweg 17</i>	<i>7,3</i>	<i>1923</i>	<i>Vrijstaand</i>	<i>2 lagen</i>	<i>Metselwerk</i>	<i>Enkelsteens</i>	<i>Dakpannen</i>
Achterste Molenweg 15	8,5	2011	Vrijstaand	2 lagen	Metselwerk	Spouwmuur	Dakpannen
Esschertsweg 13	10,9	1910	Vrijstaand	2 lagen	Metselwerk	Enkelsteens	Rieten dak

Op basis van de beschouwing van de gebouwen uit de klachteninventarisatie en de vergelijking met de 4 onderzochte gebouwen wordt geconcludeerd dat de resultaten uit de metingen een representatieve weergave vormen van de gebouwen rond het ASK met een groter risico op trillinghinder.

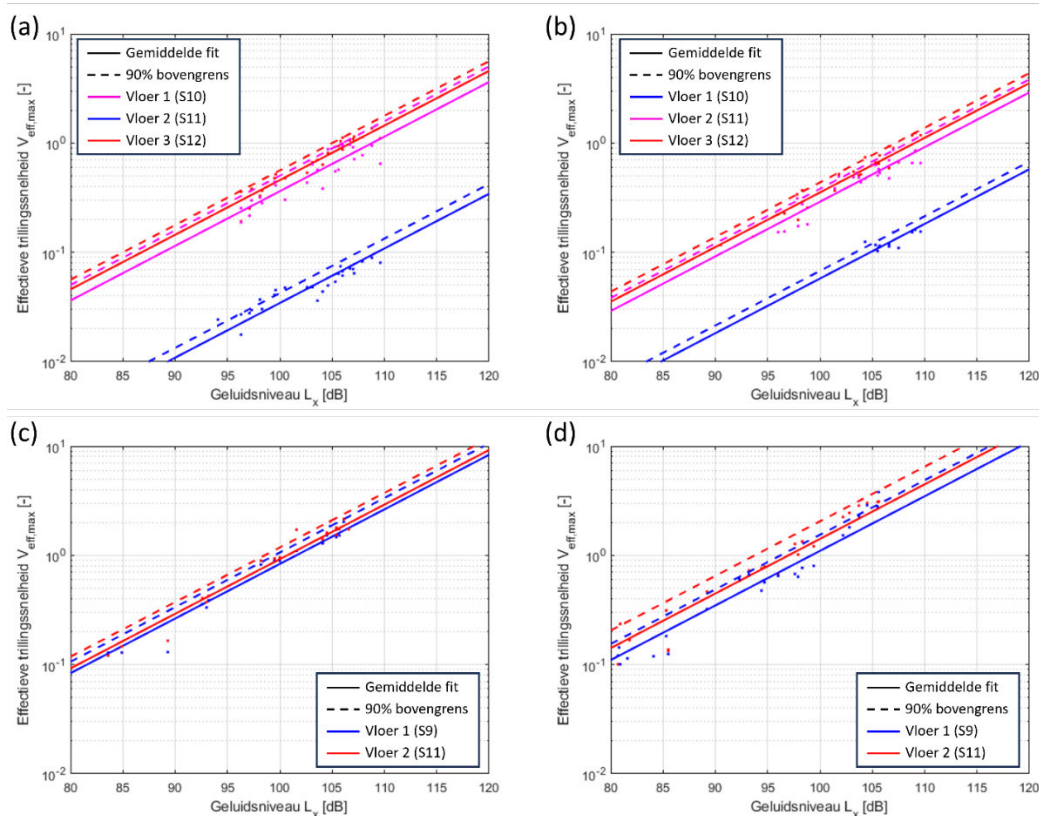
De 4 onderzochte gebouwen vormen qua afstand tot bronlocaties op het ASK ook een goede weergave vormen van dichtbij en veraf gelegen gebouwen van het ASK waar is geklaagd over trillinghinder. De tabel laat zien dat er één gebouw (Harm Aartsweg 1) was dat op kortere afstand tot het ASK lag, waarvan de bewoner een klacht heeft ingediend over trillingen. Voor de vergunningaanvraag in december 2023 zijn een aantal gebouwen gespecificeerd die op nog kleinere afstanden tot bronlocaties liggen (2,3 – 2,9 km); het is bij TNO niet bekend of bewoners van deze adressen een klacht hebben ingediend bij het ASK.

Gezien de praktische beperkingen van de metingen is onzeker in hoeverre de 4 onderzochte gebouwen een representatieve weergave vormen voor wat betreft de afstand tot het ASK. In de beoordeling van trillinghinder op verschillende locaties rond het ASK worden de geluidsniveaus aan de gevel (afhankelijk van het type wapentuig) bepaald op basis van een rekenmodel. De invloed van afstand uit zich in de geluidsdruk. Op die manier speelt de invloed van de afstand geen rol meer in de representativiteit van de 4 onderzochte gebouwen voor de andere gebouwen rond het ASK.

Bepaling maatgevende L_x - $V_{eff,max}$ -relatie

Relaties geluidsdruk en vloertrillingen onderzochte gebouwen

In rapport TNO 2016 R11226 [1] zijn alleen L_x - $V_{eff,max}$ relaties afgeleid voor de maatgevende vloer van de onderzochte woning. In deze notitie wordt een maatgevende relatie bepaald voor alle woningen rond het ASK. Om hier een zo goed mogelijke inschatting van te kunnen maken worden ook de relaties voor de andere vloeren in de 4 woningen bepaald waarop trillingsmetingen zijn uitgevoerd. De data en gefitte L_x - $V_{eff,max}$ relaties zijn weergegeven in onderstaande figuur.

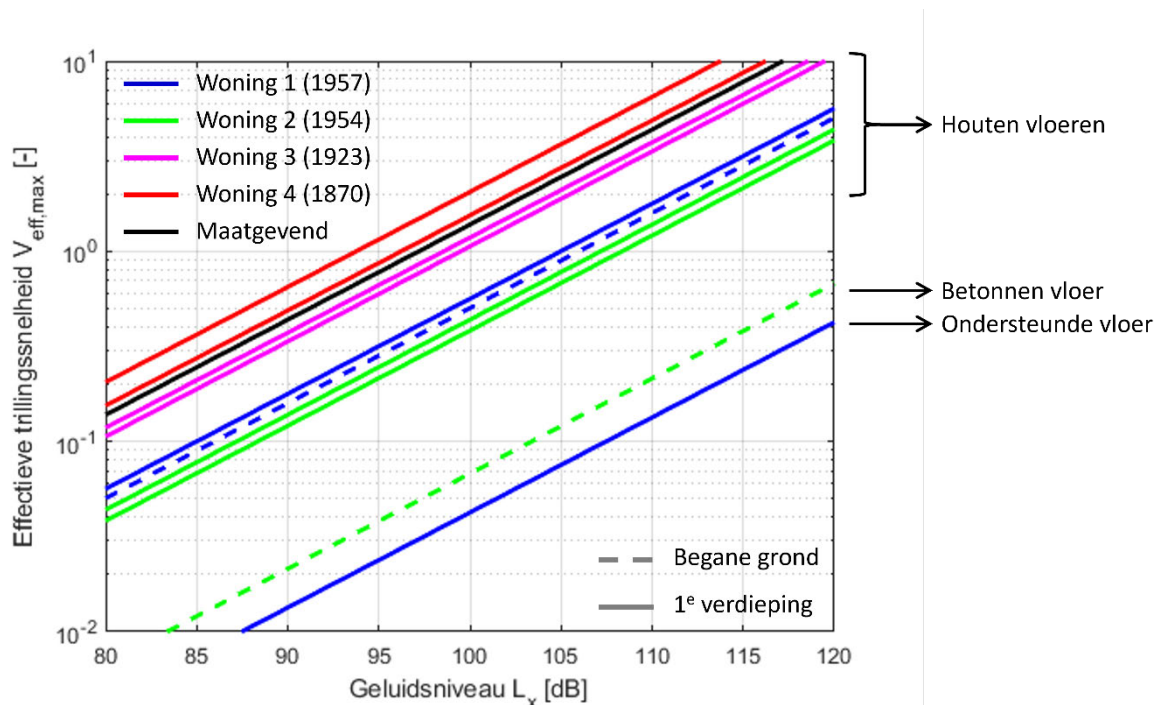


De L_x - $V_{eff,max}$ relaties bepaald voor de vloeren in woning 1 (Bovendarsweg 108), woning 2 (Vierschotenweg 46), woning 3 (Plakkenweg 17) en woning 4 (Assendorperstraat 2).

Hierbij is de gemiddelde fit met een doorgetrokken lijn weergegeven, deze was ook bepaald in TNO 2016 R11226 [1]. Ook weergegeven is de 90% bovengrens (10% overschrijdingskans) met een gestreepte lijn. Deze 90% bovengrens, bepaald voor elke vloer, die wordt gebruikt bij de bepaling van de maatgevende relatie.

Relaties geluidsdruk en vloertrillingen onderzochte gebouwen

Onderstaande figuur geeft de L_x - $V_{eff,max}$ -relaties (90% bovengrens) van alle vloeren. Hierin is goed te zien dat de betonnen vloer en de ondersteunde houten vloer in significant lagere trillingsniveaus resulteren dan de houten vloeren. Ten tweede valt op dat de houten vloeren in woning 3 en 4 gevoeliger blijken dan de houten vloeren in woning 1 en 2. Dit suggereert dat woningen met enkelsteensmuren met houten vloeren de grootste gevoeligheid hebben voor trillinghinder. Woning 4 blijkt nog iets gevoeliger dan woning 3, wat te maken zou kunnen hebben met het rieten dak. Op basis van de relaties van de houten vloeren in de 4 onderzochte woningen wordt een maatgevende relatie bepaald voor het ASK. Gezien het grote verschil in gevoeligheid tussen de houten vloeren en de betonnen vloer uit woning 2 (Vierschotenweg 46), is dit voor wat betreft het type vloer een zeer conservatieve aanname voor alle vloeren in de gebouwen rond het ASK. Daarom wordt niet uitgegaan van de meest gevoelige houten vloer uit de metingen, maar wordt gekozen voor de 80% bovengrens relatie uit de verzameling van houten vloeren uit de 4 onderzochte gebouwen. Hoewel dit lager is dan de meer gangbare 95% bovengrens die gehanteerd wordt voor trillinghinder (bij onderzoek naar spoortrillingen), wordt opgemerkt dat er meerdere conservatismen in deze maatgevende relatie zitten (houten vloeren in trillingsgevoelige gebouwen op kortste afstand van het ASK). Niet-trillingsgevoelige gebouwen zijn (zeer) ondervertegenwoordigd in deze maatgevende relatie. Daarnaast wordt aanbevolen om door middel van aanvullende metingen in een paar trillingsgevoelige gebouwen op korte afstand tot het ASK te verifiëren dat wordt voldaan aan deze relatie. De maatgevende relatie voor vloeren in gebouwen rond het ASK is met een zwarte lijn weergegeven in de figuur.



De L_x - $V_{eff,max}$ relaties (90% bovengrens) van de vloeren in de 4 onderzochte woningen en de maatgevende L_x - $V_{eff,max}$ relatie (zwarte doorgetrokken lijn) bepaald op basis van de houten vloeren (80% bovengrens).

Conclusie

In deze bijlage is ingegaan op de vraag of de metingen aan de 4 woningen nog actueel zijn voor beoordeling van trillinghinder in alle gebouwen rond het ASK. Daarnaast is een onderbouwing gegeven waarom deze gebouwen een goede weergave zijn van de trillingsgevoelige gebouwen rond het ASK. Als laatste is een overzicht gemaakt van de L_x - $V_{eff,max}$ relaties, bepaald voor de vloeren in de 4 onderzochte gebouwen. Op basis van de relaties voor de houten vloeren is een maatgevende L_x - $V_{eff,max}$ relatie voor alle gebouwen rond het ASK bepaald. In combinatie met rekenkundig bepaalde geluidsdrukken kan, voor verschillende wapentypes, met deze maatgevende relatie de trillinghinder voor gebouwen rond het ASK beoordeeld worden.

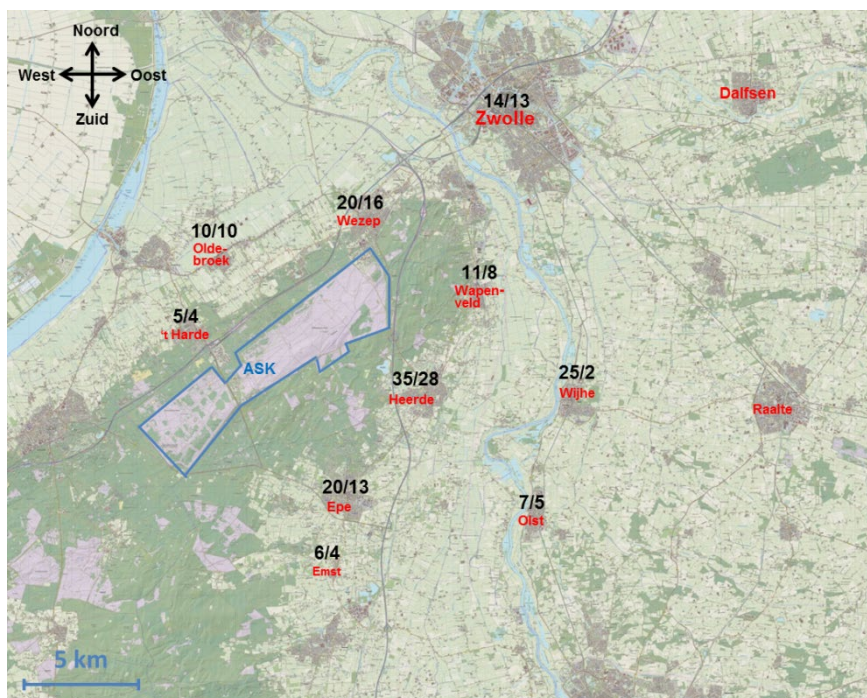
TNO beveelt aan om in geval van aanvullende metingen, deze uit te voeren aan gebouwtypen die niet goed zijn afgedekt door de 4 onderzochte woningen. Hiervoor is een uitgebreidere analyse nodig van de bouwkundige opbouw van gebouwen rond het ASK. Daarnaast wordt aanbevolen om metingen uit te voeren aan een 1 of 2 trillingsgevoelige en 1 of 2 niet-trillingsgevoelige gebouwen op korte afstand van het ASK om de maatgevende relatie te verifiëren en een beter beeld te krijgen van de trillingsgevoeligheid van alle gebouwen rond het ASK. Verder wordt aanbevolen metingen uit te voeren voor wapentypen die niet zijn beschouwd in de metingen aan de 4 gebouwen.

Aanvulling 1: Klachteninventarisatie en selectie gebouwen

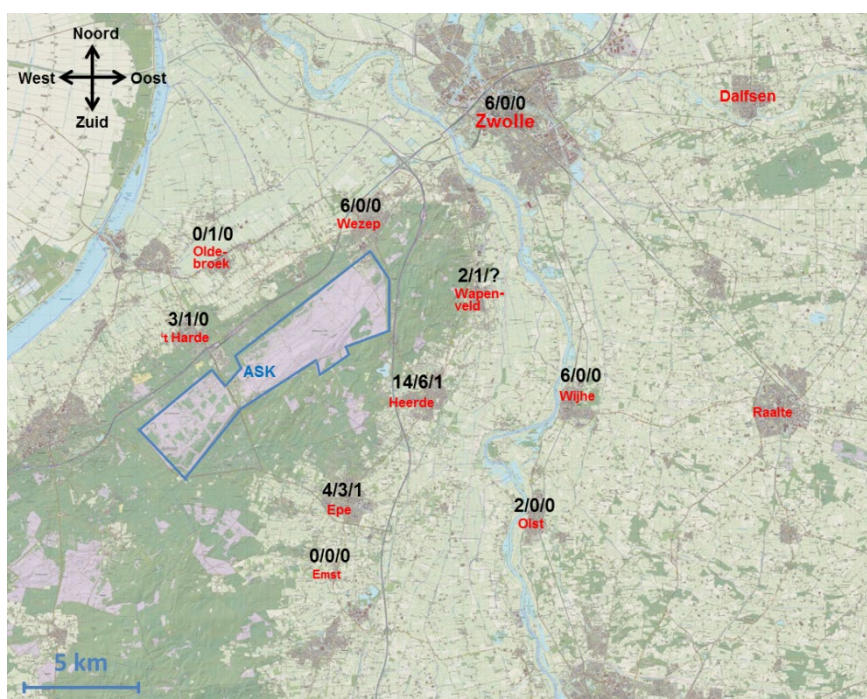
De twee onderstaande figuren geven een overzicht van klachten afkomstig uit TNO memo “Geluid- en trillinghinder ASK” [4], waarin een analyse is gepresenteerd van klachtenlijsten van 16-2-2010 tot 7-5-2015 met betrekking tot geluid- en trillinghinder door bewoners rond het ASK. Het totaal aantal geregistreerde klachten in deze periode betrof 202 en het totale aantal mensen (adressen) met een geregistreerde klacht was 148. In de figuren is een overzicht gemaakt van de klachten verdeeld naar plaatsen met meer dan 5 klachten. In de eerste figuur zijn het aantal klachten per plaats gegeven, met daarnaast het aantal mensen dat die klachten heeft ingediend. Wat opvalt is de hoeveelheid klachten en de grootte van het gebied waar de hinder is ervaren ten zuidoosten van het ASK terrein, in vergelijking tot het gebied in het noordwesten. Deze observatie illustreert de invloed van de heersende wind (volgens KNMI data komt wind uit het zuidwesten relatief vaak voor). Vanwege de invloed van het weer (met name wind) is bij de metingen expliciet rekening gehouden met de weersomstandigheden. De tweede figuur geeft een overzicht van het aantal klachten waarin ervaren trillinghinder of schade aan het gebouw werd benoemd in de klacht. Op basis van dit overzicht werd geconcludeerd dat de trillingsmetingen het beste uitgevoerd konden worden op gebouwen in Heerde, Epe, Wezep, Wapenveld, 't Harde en Oldebroek.

Onderstaande tabel geeft een overzicht van 39 gebouwen in deze plaatsen, waarvan volledige adressen (straat en huisnummer) beschikbaar zijn in de klachtenlijsten. Dit betreft 25% van alle adressen waar tussen 2010 en 2015 dusdanige hinder is ervaren van schietoefeningen op het ASK, dat een klacht is ingediend. Achter elk adres is het type klacht(en), het bouwjaar van het gebouw en informatie over de bouwkundige opbouw gespecificeerd. Het bouwjaar is verkregen via de Basisregistratie Adressen en Gebouwen van het kadaster (www.bagviewer.kadaster.nl). Informatie over de bouwkundige opbouw zijn bepaald op basis van foto's uit Google Maps (www.google.nl/maps) en Microsoft Bing Maps (www.bing.com/maps).

De eigenaren van deze 39 gebouwen zijn benaderd met de vraag of ze bereid en beschikbaar waren voor deelname aan de trillingsmetingen. Hieruit resulteerde een lijst met 14 eigenaars die in de periode van april 2016 bereid en beschikbaar waren om hun gebouw beschikbaar te stellen voor de trillingsmetingen. De week voorafgaand aan de metingen vielen hierbij twee gebouwen af, vanwege onvoorziene omstandigheden waardoor de eigenaar niet in staat was om het gebouw beschikbaar te stellen.



Plaatsen met meer dan 5 klachten ten gevolge van explosies in het ASK gebied (# klachten / # personen met klacht).



Trilling en schade gerelateerde klachten (# trilling gerelateerde klachten / # schademeldingen / # schades aan raam).

Overzicht van adressen met klachten, afstand tot bronlocatie 1 en 2 (BL1 en BL2) en informatie over het gebouw (LFG = laagfrequent geluid).

(*) Adres geselecteerd voor metingen (14 gebouwen)

Adres	Klacht	Jaar	Afstand	Informatie
Heerde				
2e Hoornerveenseweg 7	Geluid	1935	4,6 km	Vrijstaand, 2 lagen, metselwerk, enkelsteens, dakpannen
(*) Plakkenweg 17	Trillingen, schade angst	1923	7,3 km	Vrijstaand, 2 lagen, metselwerk, enkelsteens, dakpannen
Weteringdijk 12	Geluid	2000	7,3 km	Vrijstaand, 2 lagen, metselwerk, enkelsteens, rieten dak
(*) Assendorperstraat 2	Trillingen, schade angst	1870	6,7 km	Vrijstaand, 2 lagen, metselwerk, enkelsteens, rieten dak
Horsthoekerbeek 12	Geluid, schade	1930	4,9 km	Vrijstaand, 2 lagen, metselwerk, enkelsteens, rieten dak
(*) Berkenlaan 9	Geluid	1953	3,5 km	Bungalow, 1 laag, metselwerk, spouwmuur, bitumen
Berkenlaan 11	Trillingen, schade	2001	3,5 km	Vrijstaand, 2 lagen, metselwerk, spouwmuur, rieten dak
Hagedoornstraat 6	Geluid	1954	5,8 km	Vrijstaand, 2 lagen, metselwerk, spouwmuur, dakpannen
Kamperweg 3	Trillingen, schade angst	1829	5,2 km	Vrijstaand, 2 lagen, metselwerk, enkelsteens, dakpannen
2e Hoornerveenseweg 18	Trillingen	2003	4,9 km	Vrijstaand, 2 lagen, metselwerk, spouwmuur, dakpannen
Eikenlaan 1	Schade	2004	3,8 km	Vrijstaand, 2 lagen, metselwerk, spouwmuur, rieten dak
(*) Eikenlaan 4	Trillingen, schade angst	1996	3,6 km	Vrijstaand, 2 lagen, metselwerk, spouwmuur, dakpannen
Kamperweg 82	LFG, schade angst	1980	3,7 km	Vrijstaand, 2 lagen, -, -, dakpannen
Epe				
Dellenweg 12	Geluid	1950	6,2 km	Vrijstaand, 2 lagen, metselwerk, spouwmuur, dakpannen
Officiersweg 86	Geluid, LFG	1970	5,8 km	Vrijstaand, 2 lagen, metselwerk, spouwmuur, bitumen
Oude Elburgerweg 12	Trillingen	1976	6,6 km	Bungalow, 2 lagen, hout, leien dak
Esschertsweg 13	Trillingen, schade	1910	10,9 km	Vrijstaand, 2 lagen, metselwerk, enkelsteens, rieten dak
Elburgerweg 21	Schade	1954	6,4 km	Vrijstaand, 2 lagen, metselwerk, spouwmuur, dakpannen
Achterste Molenweg 15	Trillingen, schade	2011	8,5 km	Vrijstaand, 2 lagen, metselwerk, spouwmuur, dakpannen
Wisselseweg 49	Geluid	1975	8,3 km	Vrijstaand, 2 lagen, metselwerk, spouwmuur, dakpannen
Wezep				
(*) Kon. Wilhelminalaan 8	Geluid	1998	4,3 km	Vrijstaand, 2 lagen, metselwerk, spouwmuur, dakpannen
(*) Fazantenlaan 13	Trillingen	1978	4,3 km	Vrijstaand, 2 lagen, metselwerk, spouwmuur, dakpannen
Puttensteinsveldweg 15	Brandgevaar	1960	4,5 km	-
(*) Prinses Marijkelaan 6	Geluid	1956	4,3 km	Vrijstaand, 1 laag, metselwerk, spouwmuur, bitumen
(*) Stationsweg 121	Trillingen	1964	4,5 km	Vrijstaand, 2 lagen, metselwerk, spouwmuur, dakpannen
Hertenlaan 6	Geluid	1976	4,2 km	Vrijstaand, 2 lagen, metselwerk, spouwmuur, dakpannen

Adres	Klacht	Jaar	Afstand	Informatie
Stationsweg 131	Trillingen	1961	4,4 km	Vrijstaand, 2 lagen, metselwerk, spouwmuur, bitumen
Wapenveld				
Groteweg 2	Geluid	1919	5,8 km	Vrijstaand, 2 lagen, metselwerk, enkelsteens, dakpannen
(*) Henk Cramerlaan 15	Geluid, LFG	1959	7,2 km	-
Parkweg 10	Geluid, schade angst	1992	7,2 km	-
Annenkamp 19	Geluid	1986	7,1 km	Rijtjeswoning, 2 lagen, metselwerk, spouwmuur, dakpannen
't Harde				
(*) Bovendwarsweg 13	Schade	1975	5,7 km	Vrijstaand, 1 laag, metselwerk, spouwmuur, dakpannen
(*) Bovendwarsweg 108	Trillingen, schade	1957	3,4 km	Vrijstaand, 1 laag, metselwerk, spouwmuur, dakpannen
Kruisakkerweg 8	Geluid	1962	6,0 km	Rijtjeswoning, 2 lagen, metselwerk, spouwmuur, dakpannen
Oldebroek				
(*) Sportlaan 6	Geluid	1957	3,8 km	-
Harm Aartsweg 1	Schade	1932	2,9 km	-
Ottenweg 47	Geluid	1953	3,7 km	-
(*) Vierschotenweg 46	Geluid, schade	1954	3,4 km	Vrijstaand, 1 laag, metselwerk, spouwmuur, dakpannen
(*) Bovendwarsweg 69	Geluid	1957	4,4 km	-

Aanvulling 2: foto's van 14 geselecteerde gebouwen



't Harde, Bovendwarsweg 108 (woning 1 in TNO 2016 R11226 [1])



't Harde, Vierschotenweg 46 (woning 2 in TNO 2016 R11226 [1])



Heerde, Plakkenweg 17 (woning 3 in TNO 2016 R11226 [1])



Heerde, Assendorperstraat 2 (woning 4 in TNO 2016 R11226 [1])



Wezep, Fazantenlaan 13



Wezep, Stationsweg 121



Wezep, Prinses Marijkelaan 6



Wezep, Kon. Wilhelminalaan 8



Wapenveld, Henk Cramerlaan 15



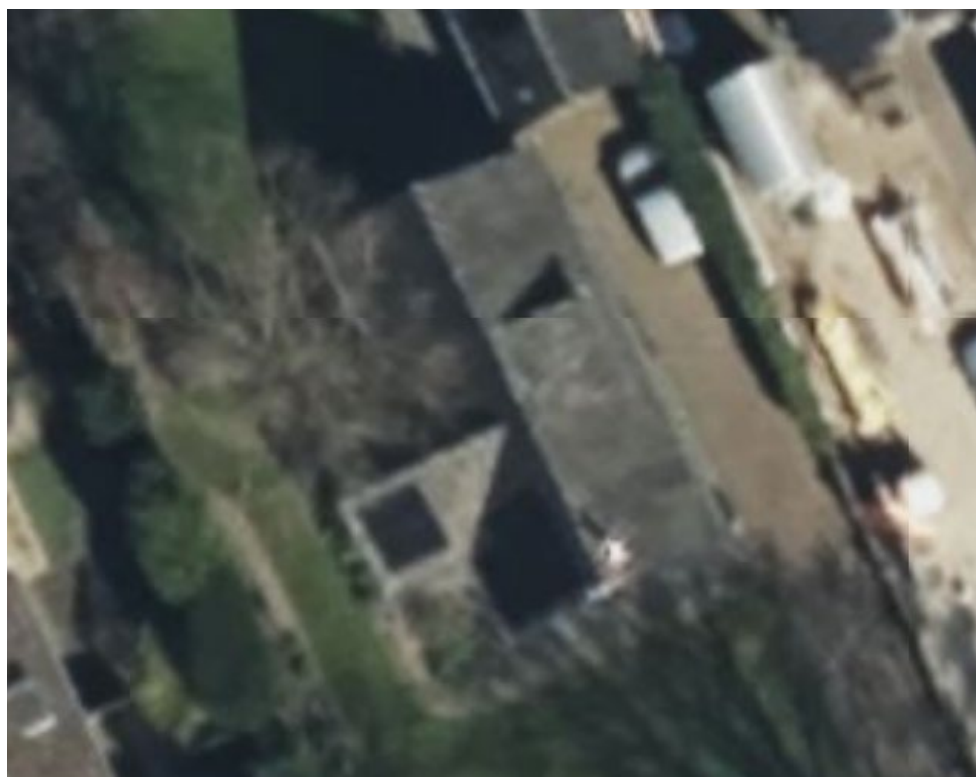
Heerde, Berkenlaan 9



't Harde, Bovendwarsweg 13



Heerde, Eikenlaan 4



Oldebroek, Sportlaan 6



Oldebroek, Bovendwarsweg 69

Referenties

- [1] Bronkhorst, A.J., van der Eerden, F.J.M., Trillingsmetingen bij het Artillerie Schietkamp te Oldebroek: Toetsing op hinder en schade van woningen in de omgeving, TNO 2016 R11226, Den Haag, 2016.
- [2] ILT, (Ontwerp)beschikking, Weigering aanvraag Revisievergunning Artillerie Schietkamp (ASK), 2023/1530, Den Haag, 2023.
- [3] SBR, Trillingen: meet- en beoordelingsrichtlijnen – Hinder voor personen in gebouwen - Deel B, Deckers Druk, Verrebroek, 2006.
- [4] Kaptein, D., Geluid- en trillinghinder ASK, TNO memo gericht aan R. van der Werf, 2015.

BIJLAGE 6

Voorstel beoordelingsrichtlijn voor herhaald voorkomende schok

Opgesteld door [REDACTED], Level Acoustics & Vibration

Toepassingsgebied

Deze beoordelingsrichtlijn geeft aanwijzingen voor de bepaling en beoordeling van de blootstelling van mensen in gebouwen aan trillingen met een schokachtig karakter. Deze richtlijn heeft het beperken van hinder bij herhaald voorkomende schok tot doel.

Schok is in de context van deze richtlijn gedefinieerd als een trilling van een vloer waarvan de aanstoting vanuit de omgeving (bodem of lucht) dermate kort is dat er geen resonantie kan optreden in de vloer.

De richtlijn is in de eerste plaats toepasbaar op explosies, met name die verband houden met mijnbouw, sloop- en constructiewerk, het ruimen van explosieven en het oefenen met explosieve wapens. Daarnaast is de richtlijn toepasbaar voor andere bronnen zolang de resulterende trillingen bij de ontvanger de aard heeft van schok zoals hierboven gedefinieerd.

De richtlijn is niet bedoeld voor het voorkomen van verstoring van apparatuur, beschadiging van kunstobjecten of schade aan gebouwen.

Aanwijzen van SBR hoofdstukken

Voor het bepalen en beoordelen van de trillingsblootstelling wordt V_{max} gebruikt, de metriek zoals gedefinieerd in SBR richtlijn B. De hoofdstukken 4 t/m 9 en de paragrafen 10.1, 10.2, 10.4 en 10.5.1 van deze richtlijn zijn van toepassing. De streefwaarden waaraan V_{max} dient te worden getoetst staan in onderhavig document. V_{per} wordt niet getoetst.

Behandelen/bespreken van SBR B paragraaf 10.3 ? (discussie over aard en duur en frequentie en zo, herhaald voorkomend versus kort durend etc, link naar verkeerstrillingen, zorgen dat de twee geen overlap hebben want die verkeersdrempel is dat niet eigenlijk schok?)

Criteria

De streefwaarden voor **bestaande** situaties is als volgt:

gebouwfunctie	dag			avond			nacht		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3	A1	A2	A3
gezondheidszorg	0,20	2,4 / $\sqrt{\#}$	-	0,10	2,4 / $\sqrt{\#}$	-	0,10	0,10	-
wonen	0,20	2,4 / $\sqrt{\#}$	-	0,10	2,4 / $\sqrt{\#}$	-	0,10	0,10	-
onderwijs en kantoor	0,30	3,2 / $\sqrt{\#}$	-	0,30	3,2 / $\sqrt{\#}$	-	0,30	3,2 / $\sqrt{\#}$	-
bijeenkomst	0,30	3,2 / $\sqrt{\#}$	-	0,30	3,2 / $\sqrt{\#}$	-	0,30	3,2 / $\sqrt{\#}$	-

Een dagdeel voldoet aan een streefwaarde indien de meetwaarde V_{max} na afronding van de meetwaarde en van de streefwaarde niet groter is dan de streefwaarde. Afronding geschiedt op 2 cijfers achter de komma en volgens NEN 1047 (dus 0,105 wordt 0,10).

Overschrijding van de streefwaarden dient zoveel mogelijk te worden vermeden. Een V_{max} van maximaal 2 maal de waarde van A2 kan in de dagperiode in bepaalde situaties acceptabel zijn.

Incidenteel, ten hoogste drie gebeurtenissen per kalenderjaar, is in de dagperiode een V_{max} van ten hoogste 8 toelaatbaar. Een gebeurtenis bestaat uit een of enkele schokken kort na elkaar. Daarbij dienen de bewoners en gebruikers van de gebouwen te worden geïnformeerd over het moment en de duur van de schokken. Verder moet er rekening worden gehouden met mogelijke schade aan bouwwerken en verstoring van apparatuur.

Bepalingsmethode

De metriek V_{max} wordt in principe bepaald met behulp van trillingsmetingen zoals beschreven in SBR richtlijn B. Het aantal relevante schokken # wordt ook op basis van metingen bepaald, eventueel in combinatie met brongegevens ten behoeve van het wegfilteren van stoortrillingen.

Het is acceptabel om V_{max} indirect te bepalen middels een proxy meting. Deze proxy meting kan zijn:

- Een trillingsmeting aan de fundering of de draagconstructie van het pand.
- Een geluidmeting met een microfoon in de directe omgeving van het pand indien er sprake is van excitatie door luchtdruk.

Door middel van een inmeting dient de relatie te worden bepaald tussen de proxy en V_{max} .

Gebiedsbeoordeling

Deze richtlijn is, net zoals SBR richtlijn B, gericht op het beoordelen van een pand met behulp van metingen in dat pand. De richtlijn kan ook worden toegepast op groepen panden zonder de noodzaak om in elk pand metingen te verrichten. Conform gebruikelijk is geworden bij de toepassing van SBR richtlijn B in bijvoorbeeld spoorprojecten en projecten langs spoorwegen kan de meting worden beperkt tot een relatief gering aantal panden en worden deze metingen vertaald naar de overige panden door middel van empirische, analytische en/of numerieke modellen. De “meetpanden” dienen representatief te zijn voor de variatie aan gebouwconstructies in het gebied.

Communicatie met de omgeving

De streefwaarden in deze richtlijn laten zekere percentages gehinderden en ernstig gehinderden toe. Om de hinder verder te beperken dient er communicatie te zijn tussen de veroorzaker en de bewoners en gebruikers van gebouwen in de omgeving. De volgende vorm van communicatie ligt daarbij voor de hand.

- Indien voor een dag wordt verwacht dat V_{max} A2 zal worden overschreden op bepaalde adressen worden de betrokken bewoners of gebruikers daar van te voren door de veroorzaker over geïnformeerd.
- De veroorzaker is benaderbaar voor klachten. Op klachten wordt binnen 2 weken inhoudelijk en persoonlijk gereageerd. Indien een reeks klachten daar aanleiding toe geeft evalueert de veroorzaker de onderliggende situatie ten einde eventueel stappen te ondernemen waarmee de kans op hinder wordt vermindert.

Onderbouwing

Deze richtlijn is gebaseerd op literatuuronderzoek. De meeste relevante literatuur betreft mijnbouw. De volgende concepten staan centraal.

- **Schok.** In nauwe zin: aanstoting met een snelheidsamplitude hoger dan de golfsnelheid van het medium. In ruime zin: aanstoting met een duur die korter is dan de nagalmtijd van het systeem.
- **Hinder.** Hinder wordt over het algemeen gedefinieerd als het verstoren van menselijke activiteiten zoals lezen, slapen, praten, kijken naar een film, etc. Hinder heeft effect op de gezondheid (WHO). De mate waarin een verstoring, zoals trillingen en schok, tot hinder leidt wordt over het algemeen onderzocht aan de hand van enquêtes onder blootgestelden. Er zijn twee gangbare manieren om hinder te kwalificeren.

De eerste is om per blootstellingsniveau de gemiddelde enquête-respons, wat betreft mate van ervaren hinder, vast te stellen. De hinderkwalificatietabel in Bijlage 5 van SBR richtlijn B is een voorbeeld van het resultaat van zo'n methode. Het geeft antwoord op de vraag: welk antwoord kan je verwachten als je *een persoon* direct na het moment van blootstelling vraagt wat deze van een bepaalde mate van blootstelling vindt?

De tweede manier is om per blootstellingsniveau vast te stellen hoeveel procent van de respondenten een bepaalde mate van hinder ervaart, zoals “gehinderd” of “ernstig gehinderd” of “(ernstig) gehinderd”. Het legt nadruk op de variatie tussen mensen. Een voorbeeld hiervan zijn de dosis-response onderzoeken zoals het RIVM die uitvoert ter illustratie van het effect van wettelijke grenswaarden voor verkeerslawaaï e.d.. Het geeft antwoord op de vraag: hoe groot is *de groep* die een bepaalde mate van blootstelling hinderlijk vindt?

De tweede methode zal in de regel altijd epidemiologisch worden uitgevoerd. Het gaat dan om de praktijk met andere fysische blootstellingen en met psychosociale factoren die allemaal de hinderbeleving beïnvloeden. Er wordt gevraagd stil te staan bij bijv. de afgelopen 12 maanden. De eerste methode wordt meestal gebruikt bij laboratoriumonderzoek. De omstandigheden zijn dan minder natuurlijk maar wel sterk geconditioneerd. Er wordt gevraagd naar iets dat net is ervaren. Het verschil in onderzoeksmethodes en de statistiek die op de resultaten wordt bedreven maakt het vergelijken van gepubliceerde hinderkwalificaties lastig. Daar komt bij dat in verschillende landen en binnen landen in verschillende onderzoeken verschillende metriecken voor de blootstelling worden gebruikt.

- **Metriek.** Voelbare trillingen en schok worden over het algemeen gemeten met versnellingsopnemers of snelheidsopnemers (geofoons). De manier van naverwerken, over het algemeen gekoppeld aan de plek waar de sensor wordt geplaatst, definieert de metriek. Er zijn voor schok in de wereld twee metrieken gangbaar: de PPV en de Vmax.
PPV staat voor peak particle velocity, de hoogst gemeten snelheidsamplitude van een trilling. Deze wordt over het algemeen bepaald aan de constructie of de fundering van een gebouw en anders op maaiveld. Het is gelijk aan de “Vtop” van de Nederlandse trillingsrichtlijn ter voorkoming van schade aan gebouwen, SBR A.
Vmax is de maximale amplitude na toepassing van een frequentieweging en een tijdfilter die het menselijk perceptiesysteem voor trillingen in rekening brengen. De oorsprong hiervan is een Duitse norm, die deze grootheid KB noemt. Vmax wordt gemeten op de vloer.
Vmax is dus qua meetlocatie en verwerking geheel gericht op perceptie. PPV is primair bedoeld voor gebouwschade. Onder gegeven omstandigheden kunnen de twee naar elkaar toe worden gerekend, waarbij onder andere de constructie van het gebouw en zijn vloeren en het tijdsverloop en de frequentieinhoud van de trilling of schok van belang zijn. Ten behoeve van het vergelijkbaar maken van literatuur over dosis-effect-relaties is de volgende duimregel vastgesteld en gehanteerd:
 $PPV = 2 \times Vmax$.

De geraadpleegde bronnen zijn opgenomen in de referentielijst. Van deze bronnen zijn uiteindelijk de volgende daadwerkelijk op enigerlei wijze gebruikt.

Referentie	Relevante onderwerpen voor normstelling
BS 6472-2:2008 [5]	Grenswaarden PPV Invloed aantallen schokken op grenswaarden
Bullen en Job [6]	Dosis-effect relaties Invloed aantallen schokken op grenswaarden
DIN 4150-2 [7]	Grenswaarden V_{max} Afwegingsmethode (communicatie omgeving)
Fidell et al. [8]	Dosis-effect relaties Invloed aantallen schokken op grenswaarden
IRMA Standard [9]	Grenswaarden PPV
Jenkins [10]	...?

Klæboe et al. [11]	Dosis-effect relaties
Lusk [12]	Afwegingsmethode (communicatie omgeving)
NYC [14]	Grenswaarden PPV
Reiher and Meister [20]	...?
Turunen-Rindel [23]	Dosis-effect relaties
SBR B [21]	Grenswaarden $V_{\max}$ Methodiek

De gehanteerde bronnen leveren o.a. de volgende samenvatting van criteria. Let op: veel bronnen hanteren als metriek de PPV (of in het Noorse geval de Vf). Deze is vertaald naar de Nederlandse metriek $V_{\max}$.

Tabel 1: overzicht van criteria voor $V_{\max}$

	soms	aantal per jaar	dagelijks	daggemiddeld	voortdurend
SBR B	8	?	0,8	$V_{\text{per}}=0,1$	0,2
DIN (gebied 4)	8	3	3	$V_{\text{per}}=0,07$	0,15
Handreiking (gebied 2)			2,5	$V_{\text{per}}=0,07$	0,15
BS6472-2			3	$3 \cdot \sqrt{3/N}$	0,15
AS	5	5%	2,5	95%	
IRMA	5	10%	2,5	90%	

De metriek, de criteria en de andere elementen van deze richtlijn zijn hier als volgt op gebaseerd.

- Metriek $V_{\max}$

De $V_{\max}$ in deze richtlijn betreft die van de SBR B en de Handreiking en is gelijk aan de KB waarde van de DIN4150.

Van de twee metrieken die internationaal worden gebruikt voor het beoordelen van trillinghinder vanwege schok cq mijnbouw is $V_{\max}$ het meest gericht op hinderlijkheid. De andere metriek, PPV, is een metriek ter beoordeling van schade en correleert minder goed met perceptie en, bij extensie, hinderlijkheid.

- Methodiek SBR B

SBR richtlijn B biedt een compleet en goed beschreven methode om trillinghinder te bepalen en te beoordelen, onafhankelijk van het type bron. Dat wat er voor de potentieel gehinderde er in principe toe doet, namelijk de aard en de duur van de trillingen en de omstandigheden waaronder ze worden ervaren, wordt gewogen in de beoordeling. SBR B heeft in de Nederland de kracht van jurisprudentie

en is sedert vele jaren algemeen geaccepteerd. De SBR B is zeer breed en algemeen opgesteld. Desondanks kent het lacunes: zo is het niet duidelijk hoe regelmatig optredende schok moet worden beoordeeld. Onderhavige richtlijn moet daarom worden gezien als een aanvulling van de richtlijn op dit punt.

- Keuze waardes A1, A2 voor woningen in bestaande situaties in de dagperiode

Volgens tabel 1 is er een redelijke consensus, internationaal, over de streefwaarde waaronder de meeste of alle gebeurtenissen zouden moeten blijven: 2,5 of 3. Alleen SBR B wijkt aanmerkelijk af, naar beneden: 0,8. In afwijking op de andere bronnen betreft dit echter een streefwaarde niet gericht op schok maar bedoeld voor verkeerstrillingen. Deze is in Tabel 1 ter referentie meegegeven en juist omdat de richtlijn SBR B onduidelijk is over herhaald verkomende schok is er de noodzaak andere bronnen te raadplegen die inderdaad andere streefwaardes geven.

Om aan te sluiten bij de methodiek van de SBR, die onder andere bestaat uit het gebruik van veelvoud van 0,2 voor de streefwaarden, ligt een streefwaarde van 2,4 of 3,2 voor de hand. Op dit punt is het van belang geacht de beschikbare dose-response-relaties te raadplegen. De twee beschikbare ([8, 11]) die iets zeggen over percentages gehinderden bij een bepaalde blootstelling liggen niet bepaald op elkaar maar geven wel aan dat het bij die waardes gaat om 20 tot 40% (ernstig) gehinderden. Klæboe ([8]) vindt rond die blootstellingsniveaus een zwakke relatie met hinder: halvering van het niveau doet het percentage slechts met 10% zakken. Klæboe zelf stelt dat de gevonden relaties opvallend negatief (dus hoge hinderpercentages) afwijken van ander onderzoek en vermoedt de invloed van niet gecontroleerde omstandigheden leidend tot een versterkte invloed van psycho-sociale factoren (zoals de nieuwheid van een situatie). Zo betreffen 5 van de 8 cases geen groeves maar tunnelbouw. Van versterkte invloed van psycho-sociale factoren kan tevens worden verwacht dat deze de dose-response-relatie verzwakt.

Fidell ([11]) vind een veel sterkere dose-response en dus een sterk verschil tussen 2,4 en 3,2. Bij 2,4 kan het percentage (ernstig) gehinderden bij Fidell worden geschat op 20%. Bij 3,2 is dat al boven de 30%. Daarbij dient in aanmerking te worden genomen dat daarbij een vertaalslag nodig is van de metriek van Fidell (PPV op de fundering) naar die van de SBR (Vmax op de vloer). Aangezien van andere hinderblootstellingen bekend is dat wettelijke grenswaarden liggen bij 10 tot 20% (ernstig) gehinderden ligt het voor de hand om 2,4 te hanteren als streefwaarde.

De SBR B kent ook een onderste streefwaarde, A1. Gebeurtenissen onder deze streefwaarde worden sowieso acceptabel geacht. Daarboven begint het aantal ervan mee te tellen (middels de Vper en in deze richtlijn middels #). De SBR B hanteert hiervoor, bij verkeerstrillingen, 0,2. De paar andere bronnen die hiervoor zijn (DIN, Handreiking, British standard) stellen 0,15. Onderhavige richtlijn hanteert 0,2 om de volgende reden. Uit perceptieonderzoek (REF!) blijkt dat de attentiewaarde voor schok lager is dan voor trillingen. Dit kan verklaard worden omdat een piek in een trilling, die leidt tot Vmax van die trilling, "aangekondigd" wordt. Een schok, dicht bij de perceptiegrens, moet iets sterker zijn om duidelijk ervaren te worden. De 0,2 van SBR B, bedoeld voor trillingen, is dus zeker ook geschikt voor schok. De 0,15 van andere bronnen lijken wat conservatief.

- Wortel # in plaats van Vper

Vper wordt in SBR B gebruikt om de duur van de blootstelling, over een dagdeel, in rekening te brengen bij de beoordeling. Er zijn twee issues met Vper. Ten eerste zijn de streefwaardes voor Vper (A3) in veel gevallen dermate ruim gekozen dat deze in feite nooit relevant is. Voor verkeerstrillingen geldt bijvoorbeeld dat er tenminste 25% van de tijd(-sintervallen) sprake moet zijn van voelbare trillingen, wat hoegenaamd nergens optreedt. Zoals de Vper en de waardes voor A1, A2 en A3 zijn ingericht is het bedoeld te beschermen tegen permanentente blootstelling over aanmerkelijke delen van een dagperiode. Van kortdurende events met wisselende sterkte die tientallen tot honderden keren in een dagdeel voorkomen wordt het aantal keren van optreden dus in veel gevallen niet meegewogen.

Ten tweede telt voor Vper bij meerdere trillingsgebeurtenissen binnen een interval van 30 seconde alleen de sterkste mee. Dat is met name terug te voeren naar de beperkingen van de vastleggings- en verwerkingsapparatuur ten tijde van het tot stand komen van de DIN4150. Voor schok-bronnen levert dat een nogal willekeurige begrenzing op: meer schokken vlak na elkaar worden samengevat tot één.

De Britisch standard (BS6472) laat het aantal events meetellen door een grenswaarde te verzwaren met de wortel over het aantal events. Dat komt in zekere zin overeen met de Vper aangezien die intervallen met dezelfde trillingssterkte met de wortel over het aantal ervan meetelt. In afwijking van de Vper gaat het aantal niet pas meetellen als dat aantal groot is maar vanaf het 4de event. Dat het van belang is het aantal mee te laten tellen, en al vanaf kleine aantallen, en bijvoorbeeld met de wortel over het aantal, blijkt uit het onderzoek hiernaar van Fidell (zie [8]). Fidell zocht naar een optimale methode hiervoor en vond dat percentielwaardes rond 85% het best correleerde met functies van N, waarbij N het aantal gebeurtenissen met sterktes boven de percentielwaardes betreft. Fidell onderzocht, naast wortel N, overigens ook hogere machten van wortel N maar had onvoldoende data om aan te tonen dat andere functies van N dan wortel N een betere correlatie met hinder levert. De Britisch standard telt wortel N vanaf het vierde event op een dag en komt neer op het hanteren van een percentielwaarde en tellen van N boven die waarde van 75% bij weinig events tot 90% bij veel events. Zowel Fidell als de Britisch standard dragen uit dat de beleving, en hinderlijkheid, van schok wordt bepaald door de deelverzameling van heftigste gebeurtenissen, en daar (de wortel van) het aantal van. De Vper, een soort van daggemiddelde, doet dit niet. Om die reden wordt in deze richtlijn afgeweken van de SBR B, Vper niet gebruikt, maar conform de Britisch standard A2 verzaard met de wortel van #, het aantal van de 15% sterkste events.

- Overschrijding van A2

Onderdeel van de methodiek van de SBR B is dat er ruimte is voor overschrijding van alle streefwaarden (A1, A2 en A3). De criteria worden om die reden dan ook niet “grenswaarden” genoemd zoals dat wel in SBR A (schade aan gebouwen) het geval is. De streefwaarden kunnen worden gezien als “voorkeursgrenswaarden”. Daaronder is de trillingsblootstelling volgens de richtlijn acceptabel. Aangezien alle jurisprudentie positief (of in ieder geval niet negatief) is over het gebruik van de SBR B kan een situatie die de richtlijn acceptabel noemt gezien worden als een “goed woon- en leefklimaat”. Boven de streefwaarden dient de veroorzaker in overleg te treden met de bewoners/gebruikers en dienen indien mogelijk maatregelen te worden genomen volgens het ALARA (as low as reasonably achievable) principe. Gesteld deze inzet zullen in bepaalde situaties (door de richtlijn niet nader gespecificeerd) overschrijdingen van de streefwaarden alsnog acceptabel zijn. Voor verkeerstrillingen geeft de richtlijn (in haar Bijlage 5) een aanwijzing voor welke mate van overschrijding nog acceptabel zou kunnen zijn: waardes van Vmax boven de 3,2 worden in geen enkele situatie van verkeerstrillingen acceptabel geacht. Dit is factor 4 boven de hoogste streefwaarde die de richtlijn kent voor verkeerstrillingen (0,8) en een factor 8 boven de vaakst maatgevende streefwaarde (de nachtelijke 0,4). Deze 3,2 is niet de hoogste toelaatbare waarde in de richtlijn. Voor bouwactiviteiten (paragraaf 10.5.4 van SBR B) die maximaal 3 maanden duren geldt een A2 (bovenste streefwaarde voor Vmax) van 6. De A1 (onderste streefwaarde) is overigens dan ook ruimer en varieert tussen de 0,3 en 0,8, afhankelijk van het totaal aantal werkdagen. De Australische norm en de richtlijn van de IRMA kennen ook een grenswaarde boven de streefwaarde: zij laten toe dat 5% (Australisch) of 10% (IRMA) van de schokken de streefwaarde overschrijden tot een factor 2. Als zulke overschrijdingen verwacht worden dient de omgeving daarvoor gewaarschuwd te worden. Hun grenswaarde voor PPV, waaronder 100% van de schokken dienen te blijven, is te vertalen naar een Vmax van 5.

Op basis van deze overwegingen biedt de onderhavige richtlijn de mogelijkheid de streefwaarden te overschrijden tot maximaal een factor 2 van A2. Het aantallen schokken per etmaal weegt nog steeds mee en de hoogst mogelijke waarde voor Vmax is 4,8 (maximaal 7 schokken in dat etmaal).

Het is uiteraard niet gegeven dat dat acceptabel is. In ieder geval dient er overleg te zijn met de omgeving hierover en dienen alle mogelijke doelmatige maatregelen te worden genomen.

Tot slot biedt deze richtlijn de mogelijkheid om incidenteel waardes van V_{max} tot 8 toe te laten, onder voorwaarde dat deze worden aangekondigd. Dit is in overeenstemming met paragraaf 10.5.5 van SBR B en voegt daar een invulling aan toe van het begrip “incidenteel” in de vorm van 3 maal per kalenderjaar waarmee het aansluit bij de bron van deze paragraaf (DIN4150).

- Extrapolatie naar andere gebouwfuncties, naar nieuwe situaties en naar andere dagdelen

De methodiek van de SBR omvat een beoordeling van de situatie afhankelijk van het moment op de dag, de functie van een gebouw (of vertrek) en of er sprake is van een bestaande situatie of een nieuw gecreëerde. Hoewel bestaande situaties van woningen overdag blootgesteld aan schok het meest voorkomend is en de beschikbare referenties voornamelijk daar over gaan, is het raadzaam de methodiek hier ook verder in te volgen. De manier waarop de richtlijn voor andere type trillingen streefwaarden stelt voor verschillende situaties kan worden overgenomen voor schok.

SBR B stelt wonen en gezondheidszorg gelijk aan elkaar, is een factor 1,5 ruimer voor onderwijs, kantoor en bijeenkomst. Dit is in onderhavige richtlijn overgenomen voor schok.

Wat betreft de etmaalperiodes (dag, avond en nacht) is niet geheel de SBR gevolgd. De schok referenties, zoals de Britische en de Australische norm, gaan allen uit van blootstelling alleen gedurende werktijd, overdag. Schokken tijdens de avond en de nacht worden dus niet toegelaten. De SBR B schakelt de dag en de avond aan elkaar gelijk bij trillingen die gedurende langere tijd plaatsvinden (zoals industriële trillingen en verkeerstrillingen). In de nacht speelt hinder in verband met slaapverstoring een belangrijke rol en is de richtlijn een stuk strenger.

Onderhavige richtlijn sluit aan bij de internationale normen en richtlijnen door in de nacht geen voelbare schokken toe te laten, in verband met slaapverstoring, maar volgt verder de SBR B door wel in de avond schok toe te laten. De bovenste streefwaarde (A2) is gelijk aan die van de dag maar omdat schok (in tegenstelling tot bijvoorbeeld verkeerstrillingen) over het algemeen planbaar zal zijn is er een stimulans ingebouwd de avond te mijden door de onderste streefwaarde (A1) bij de gevoelsgrens te leggen waardoor elke voelbare schok meetelt in de verlaging van de A2 van die dag middels wortel #.

Referentielijst

- [1] Acoustical Society of America. Standards Secretariat, 1983. American National Standard Estimating Airblast Characteristics for Single Point Explosions in Air, with a Guide to Evaluation of Atmospheric Propagation and Effects. American Institute of Physics.
- [2] Albert, D.G., Taherzadeh, S., Attenborough, K., Boulanger, P. en Decato, S.N., 2013. Ground vibrations produced by surface and near-surface explosions. *Applied Acoustics*, 74(11), pp.1279-1296.
- [3] Aloui, M., Bleuzen, Y., Essefi, E. en Abbes, C., 2016. Ground vibrations and air blast effects induced by blasting in open pit mines: Case of Metlaoui Mining Basin, Southwestern Tunisia. *Journal of Geology and Geophysics*, 5(3).
- [4] Bakhtar, K., Zimmerman, H., Sagal, E., Jenus, J. en Begert, C.M., 1996, August. Human response to explosion-induced noise and vibrations. In 27th Explosives Safety Seminar, Department of Defense Explosives Safety Board, Las Vegas, Nevada.
- [5] British Standards, 2008. Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings, BS 6472-2:2008.
- [6] Bullen, R.B. en Job, R.F.S., 1985. Re-analysis of data presented in "Community response to blasting" by Fidell et al. [*J. Acoust. Soc. Am.* 74, 888-893 (1983)]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 78(2), pp.799-800.
- [7] Deutsches Institut für Normung, 1999. DIN 4150-2: Structural vibrations-Part 2: Human exposure to vibration in buildings.
- [8] Fidell, S., Horonjeff, R., Schultz, T. en Teffeteller, S., 1983. Community response to blasting. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 74(3), pp.888-893.
- [9] IRMA, 2023. DRAFT standard for responsible mining and mineral processing 2.0,
- [10] Jenkins, J.E., 1956. Human Response to Industrial Blasting Vibrations. *TRANSACTIONS OF THE AMERICAN INSTITUTE OF MINING AND METALLURGICAL ENGINEERS*, 205(5), pp.535-538.
- [11] Klæboe, R., Amundsen, A.H., Madshus, C., Norén-Cosgriff, K.M. en Turunen-Rindel, I., 2016. Human reaction to vibrations from blasting activity-Norwegian exposure-effect relationships. *Applied Acoustics*, 111, pp.49-57.
- [12] Lusk, B.T., 2006. An analysis and policy implications of comfort levels of diverse constituents with reported units for blast vibrations and limits: closing the communication gap. University of Missouri-Rolla.
- [13] Madshus, C., Løvholt, F., Kaynia, A., Hole, L.R., Attenborough, K. en Taherzadeh, S., 2005. Air-ground interaction in long range propagation of low frequency sound and vibration—field tests and model verification. *Applied Acoustics*, 66(5), pp.553-578.
- [14] New York City, 2022. New York City Fire Code, Section 3307 Blasting Operations.
- [15] Nicholls, H.R., Johnson, C.F. en Duvall, W.I., 1971. Blasting vibrations and their effects on structures (p. 656). Washington: US Government Printers.
- [16] Norén-Cosgriff, K.M., Ramstad, N., Neby, A. and Madshus, C., 2020. Building damage due to vibration from rock blasting. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 138, p.106331.
- [17] Norwegian Standards Association, 2022. Vibration and shock - Guideline limit values for construction work, open-pit and pit mining and traffic - Part 1: Effects of vibration and air blast on construction works, including tunnels and rock caverns. NS 8141-1.
- [18] Norwegian Standards Association, 2005. Vibration and shock - Measurement of vibration in buildings from landbased transport and guidance to evaluation of effects on human beings. NS 8176.
- [19] Ongen, T., Konak, G. and Karakus, D., 2020. Vibration Discomfort Levels Caused by Blasting According to Gender. *Environmental & Earth Sciences Research Journal*, 7(3).
- [20] Reiher, H. and Meister, F.J., 1931. Die empfindlichkeit des menschen gegen erschütterungen. *Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens A*, 2(11), pp.381-386.
- [21] SBR, 2006. Trillingen: meet- en beoordelingsrichtlijnen, Deel B.

- [22] Siskind, D.E., Strachura, V.J., Stagg, M.S. and Kopp, J.W., 1980. Structure response and damage produced by airblast from surface mining (Vol. 8485). US Department of the Interior, Bureau of Mines.
- [23] Stagg, M.S., 1984. Effects of repeated blasting on a wood-frame house (Vol. 8896). US Department of the Interior, Bureau of Mines.
- [24] Turunen-Rindel, I., Klæboe, R. and Norén-Cosgriff, K., 2017. Study on human reactions to vibration from blasting activities nearby dwellings.
- [25] Wright, W.P., 1994. Army blast claims evaluation procedures. Adelphi, MD, p.39.
- [26] Yao, Q., Yang, X. and Li, H., 2015. Comparative analysis on the comfort assessment methods and standards of blasting vibration. *Journal of Vibroengineering*, 17(2), pp.1017-1036.
- [27] Yan, P., Lu, W., Zhang, J., Zou, Y. and Chen, M., 2017. Evaluation of human response to blasting vibration from excavation of a large scale rock slope: a case study. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 16, pp.435-446.
- [28] Zhang, J., Jiang, N., Zhou, C. and Zhao, K., 2022. Shaking Table Experiment of Human Comfort under Blasting Vibration and Engineering Application.