

# **Overzicht onderzoek schade aan gebouwen door geïnduceerde seismiciteit**

TNO 2024 R12427/A – 26 november 2025

## Overzicht onderzoek schade aan gebouwen door geïnduceerde seismiciteit

|                     |                                  |
|---------------------|----------------------------------|
| Auteurs             | J.P. Pruiksma                    |
| Rubricering rapport | TNO Publiek                      |
| Titel               | TNO Publiek                      |
| Rapporttekst        | TNO Publiek                      |
| Aantal pagina's     | 33 (excl. voor- en achterblad)   |
| Aantal bijlagen     | 0                                |
| Opdrachtgever       | EZK                              |
| Programmanaam       | Onderzoek Mijnbouw en Omgeving   |
| Projectnaam         | Onderzoek kwetsbaarheid gebouwen |
| Projectnummer       | 060.58401/01.06.12               |

**Alle rechten voorbehouden**

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

© 2025 TNO

# Inhoudsopgave

|     |                                                                                              |    |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1   | Inleiding .....                                                                              | 4  |
| 2   | TNO onderzoek voor de SBR Richtlijn A.....                                                   | 6  |
| 3   | Empirische kwetsbaarheidskrommen .....                                                       | 10 |
| 3.1 | Empirische kwetsbaarheidskrommen, directe aanpak (TNO, 2009).....                            | 10 |
| 3.2 | Empirische kwetsbaarheidskrommen met directe aanpak voor de Huizinge beving (TNO, 2013)..... | 12 |
| 3.3 | Empirische kwetsbaarheidskrommen op basis van Bayesiaanse aanpak (TNO, 2018) .....           | 13 |
| 4   | Numeriek onderzoek naar kwetsbaarheidskrommen.....                                           | 15 |
| 4.1 | Kwetsbaarheidskrommen met 2D modellen.....                                                   | 15 |
| 4.2 | Kwetsbaarheidskrommen met 3D modellen.....                                                   | 16 |
| 5   | Overige onderwerpen .....                                                                    | 23 |
| 5.1 | Mogelijkheid om schade te beoordelen zonder integratie van de kwetsbaarheidskrommen.....     | 23 |
| 5.2 | Vergelijking van geïnduceerde seismiciteit met andere trillingsbronnen.....                  | 24 |
| 6   | Conclusies en Aanbevelingen .....                                                            | 25 |
| 7   | Referenties .....                                                                            | 27 |
| 8   | Ondertekening.....                                                                           | 31 |

# 1 Inleiding

Mijnbouwactiviteiten zoals gaswinning, gasopslag en geothermie leiden mogelijk tot ondiepe geïnduceerde aardbevingen die trillingen aan het aardoppervlak veroorzaken die worden doorgegeven aan gebouwen. Dit roept de vraag op of dit kan leiden tot schade aan gebouwen en of er sprake is van potentiële veiligheidsrisico's. Veiligheidsrisico's zijn aan de orde als sprake is van volledig of gedeeltelijk instorten van gebouwen, met een kans op overlijden van personen ten gevolge daarvan. Hierbij gaat het om zeer hoge trillingsniveaus met uiterst kleine kansen van optreden. Bij de vraag of er schade optreedt wordt gekeken naar het ontstaan of groeien van scheuren met name in metselwerk of stucwerk ten gevolge van geïnduceerde bevingen. De trillingsniveaus waarbij schade ontstaat zijn veel lager dan die van de bevingen waar veiligheidsrisico's een rol spelen. In dit document verwijzen "schade" en "schaderisico's" specifiek naar dit type schade.

Voor de beoordeling van schaderisico's ten gevolge van geïnduceerde aardbevingen is er geen landelijk vastgestelde norm. Voor de beoordeling van de schaderisico's voor trillingen veroorzaakt door bouwwerkzaamheden of verkeer wordt gebruik gemaakt van de SBR Richtlijn A (SBR-A, 2017). In de SBR Richtlijn A worden aardbevingen als trillingsbron niet expliciet behandeld, maar ook niet uitgesloten. Het gebruik van de SBR Richtlijn A voor inschatting van schaderisico's bij geïnduceerde seismiciteit door geothermie is al besproken bij de totstandkoming van de richtlijn (SBR-A, 2017), is ook voorgesteld in SDRA voor geothermie (TNO/EBN, 2023) en suggesties voor een normstelling zijn beschreven in een advies over risicobeleid seismiciteit (Hooglerarenpanel, 2021a, 2021b).

Er zijn nog diverse inhoudelijke kwesties en onderzoekspunten die uitgewerkt moeten worden voordat de SBR Richtlijn A op geïnduceerde seismiciteit kan worden toegepast. De richtlijn is ontwikkeld voor situaties waar trillingen aan gebouwen zijn gemeten, maar bij geïnduceerde seismiciteit zijn er voor de meeste gebouwen geen meetgegevens. Daarom moet worden gewerkt met voorspelde trillingsniveaus via een bodembewegingsmodel, waarbij het trillingsniveau ter plaatse van een gebouw slechts als kansverdeling beschikbaar is. In dat geval kunnen de grenswaarden uit de richtlijn niet direct gebruikt kunnen worden voor schadebeoordeling, en is een probabilistische aanpak nodig om de schadekans te bepalen. De richtlijn biedt hiervoor onvoldoende handvatten. Daarnaast sluit de veelgebruikte PGV-intensiteitsmaat uit bodembewegingsmodellen slecht aan bij de  $V_{top}$  trillingsgrootte die de richtlijn hanteert voor schadebeoordeling. Tot slot verschilt de aard van de aanstoting van een gebouw door een aardbeving van die bij de expliciet genoemde trillingsbronnen in de richtlijn. Het is dan ook de vraag of de grenswaarden ongewijzigd toegepast kunnen worden op geïnduceerde seismiciteit als trillingsbron.

In het AGE bovengrond programma onderzoekt TNO de kwetsbaarheid van gebouwen. TNO heeft ook schade en schaderisico's ten gevolge van trillingen onderzocht in eerdere projecten, zoals bij de totstandkoming van de SBR Richtlijn A en projecten voor het Instituut Mijnbouwschade Groningen (IMG). Dit rapport vat het door TNO uitgevoerde onderzoek samen dat gerelateerd is aan de hierboven beschreven vragen en beschrijft welke kennislacunes er nog zijn met betrekking tot de toepassing van de SBR Richtlijn A op geïnduceerde seismiciteit.

Dit rapport is als volgt gestructureerd. Hoofdstuk 2 vat de resultaten van het onderzoek van TNO bij de totstandkoming van de SBR Richtlijn A samen en bespreekt de beperkingen van de huidige SBR A Richtlijn voor toepassing op geïnduceerde seismiciteit. Hoofdstuk 3 gaat in op het TNO onderzoek waar empirische kwetsbaarheidscurves afgeleid zijn op basis van de beschikbare meetdata en schaderapportages na aardbevingen in Groningen. Hoofdstuk 4 gaat in op de afleiding van schade kwetsbaarheidskrommen via numerieke modellering in 2D en 3D. Hoofdstuk 5 bespreekt enkele losstaande onderwerpen uit TNO onderzoek die relevant zijn voor de genoemde vragen. Hoofdstuk 6 geeft conclusies en aanbevelingen voor het onderzoeken van de nog openstaande vragen. In bijlage A zijn de definities van schadetoestanden opgenomen waaraan gerefereerd wordt in dit rapport.

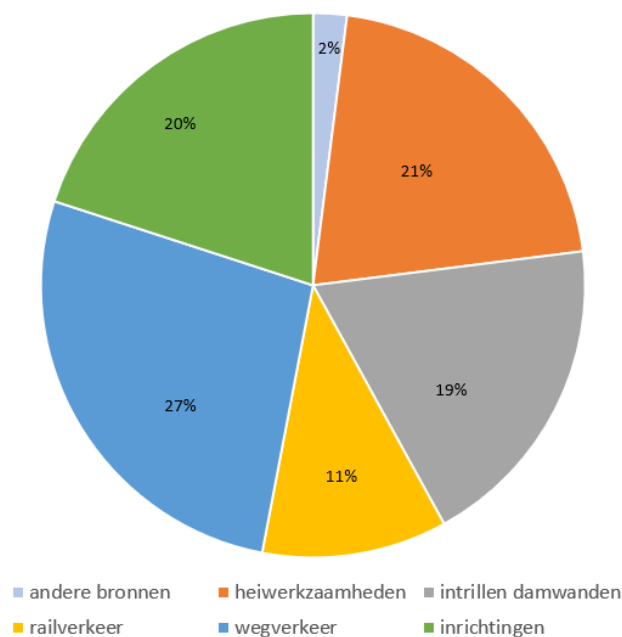
Het onderzoek beschreven in Hoofdstuk 3 en Hoofdstuk 4 is actueel en loopt de komende jaren nog door. In grote lijnen wordt verwacht dat de empirische en via numerieke modellen verkregen kwetsbaarheidskrommen inzicht zullen bieden in de vraag of de grenswaarden voor trillingsniveaus in de SBR Richtlijn A voor geïnduceerde seismiciteit herzien moeten worden. Daarnaast kunnen de empirische kwetsbaarheidskrommen mogelijk gebruikt worden voor de validatie van numeriek bepaalde kwetsbaarheidskrommen bij de opgetreden trillingsniveaus. De numeriek bepaalde kwetsbaarheidskrommen bieden vervolgens verder inzicht in de toename van de schadekans bij stijgende trillingsniveaus, wat essentieel is voor de hierboven beschreven probabilistische aanpak.

## 2 TNO onderzoek voor de SBR Richtlijn A

De oorspronkelijke SBR trillingen meet- en beoordelingsrichtlijn voor schade aan gebouwen, de SBR-Richtlijn 1, dateert uit 1993 en is twee maal herzien: (SBR-A, 2002, 2017). Bij de totstandkoming van deze richtlijn en de herzieningen heeft TNO achtergrondonderzoek uitgevoerd.

In (TNO, 1993) is uitgebreid literatuuronderzoek verricht naar normen, richtlijnen en publicaties in binnen- en buitenland. Op basis hiervan is een voorstel gedaan voor de SBR-Richtlijn 1, de eerste versie van de SBR-richtlijn A. Voor een groot deel zijn hiervoor criteria en bepalingsmethoden uit de Duitse DIN norm (DIN 5140-3, 1986) overgenomen. Uit de beschouwde studies werd duidelijk dat toepassing van een snelheidscriterium als grenswaarde voor het trillingsniveau voor de hand ligt en dat bij de in de SBR-richtlijn A voorgestelde grenswaarden de schade zeer beperkt is. Dit blijkt onder andere uit onderzochte case studies en het feit dat in de richtlijnen die veel gebruikt werden voorafgaand aan de SBR-richtlijn A (TNO, 1967; CUR 57, 1972; DIN 5140-3, 1986) er in de adviespraktijk slechts zeer beperkt schade is geobserveerd. Evenwel is in (TNO, 1993) geconcludeerd dat de kans op schade bij het bereiken van de grenswaarde niet gegeven kon worden en er werd aanbevolen om dit nader te onderzoeken.

In de eerste herziening, die nu SBR-richtlijn A (SBR-A, 2002) genoemd werd, heeft TNO een enquête uitgevoerd naar gebruik van de SBR-Richtlijnen (TNO, 2000) en een literatuurstudie naar nieuw onderzoek in de periode 1993-1999 (TNO, 1999). Uit de enquête volgde dat de toenmalige SBR Richtlijn voor schade het meest werd toegepast bij heiwerkzaamheden, het intrillen van damwanden, railverkeer, wegverkeer en inrichtingen, zie [Figuur 2.1](#). In de enquête werd geïnduceerde seismiciteit niet genoemd door de deelnemers. Dit is begrijpelijk, want de SBR-Richtlijn A is een meet- en beoordelingsrichtlijn. Er werd gemeten tijdens de aanwezigheid van een trillingsbron. Ideeën over gebruik van de richtlijn in combinatie met voorspellingsmodellen kwamen pas later op gang.



**Figuur 2.1:** Toepassing van de oorspronkelijke SBR Richtlijn voor schade uit (TNO, 2000).

In de eerste herziening van de SBR-richtlijn A (SBR-A, 2002) is de belangrijkste wijziging in het kader van het voorliggend document het toevoegen van de indicatieve meting. De indicatieve meting is een meting in slechts een enkel meetpunt op het beganegrondniveau in een stijf punt van de draagconstructie. Dit is toegestaan als de trillingsbron via de bodem aangrijpt (bronnen waarvoor dit niet geldt zijn bijvoorbeeld explosies die deels het gebouw via de lucht in trilling brengen). De indicatieve meting vereenvoudigt het meetproces en de uitwerking in ruil voor een partiële veiligheidsfactor die leidt tot een lagere grenswaarde waaraan getoetst wordt. Een andere relevante toevoeging in (SBR-A, 2002) is het beschrijven van een kans op schade bij het bereiken van de grenswaarde. De wens om inzicht te krijgen in de kans op schade volgde uit de enquête (TNO, 2000). In hoofdstuk 10 van SBR-A (2002) wordt voor het eerst een indicatie van een schadekans geformuleerd bij het bereiken van de grenswaarde:

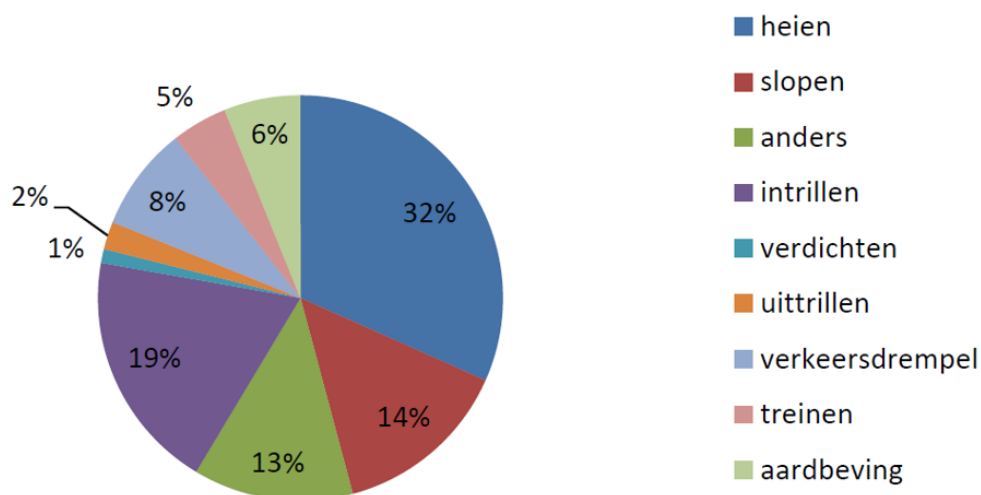
*Volgens de bestaande praktijkervaring bestaat er een aanvaardbare kans (kleiner dan 1%) dat er schade aan bouwwerken en funderingen zal optreden indien de rekenwaarde van  $V_{top}$  [de trillingssnelheid] kleiner is dan de (rekenwaarde van de) grenswaarde.*

In SBR-A (2002) is geen informatie gegeven over de kans op schade als de grenswaarde (licht) wordt overschreden. In het kader van risicoanalyses bij bouwprojecten is inzicht in de kans op schade gegeven optredende trillingen gewenst. Voor de tweede herziening van de SBR-A, (2017) heeft TNO vooral aandacht geschonken aan de toename van de kans op schade bij (lichte) overschrijding van de SBR-A grenswaarden. Hiertoe is een literatuurstudie verricht (TNO, 2016a), zijn numerieke analyses uitgevoerd om de kans op schade te bepalen, (TNO, 1997; 2016b; 2017) en is praktijkdata geanalyseerd om empirisch de kans op schade te bepalen (TNO, 2016c). Deze praktijkdata is van diverse partijen afkomstig en bevatte 360 meetcampagnes bij verschillende typen trillingsbronnen aan verschillende typen gebouwen, zie [Figuur 2.2](#) voor de trillingsbronnen. Uit de combinatie van het numerieke onderzoek en de evaluatie van de praktijkdata is een tabel opgesteld met ordegrrootte kansen op schade gegeven de mate van overschrijding van de grenswaarde, zie [Tabel 2.1](#).

**Tabel 2.1:** Ordegrootte kans op schade voor draagconstructie en onderdelen van de constructie uit metselwerk uit (SBR-A, 2017)

| Factor op de grenswaarde                  | Ordegrootte kans op schade |
|-------------------------------------------|----------------------------|
| 1 x grenswaarde ( $\frac{V_d}{V_r} = 1$ ) | Ongeveer 1%                |
| 1,2                                       | Ongeveer 3%                |
| 1,5                                       | Ongeveer 5%                |
| 2                                         | Ongeveer 10%               |
| 3                                         | Ongeveer 30%               |

Voor trillingsniveaus lager dan de grenswaarde staat nu in de (SBR-A, 2017): *Als de trillingsbelasting lager is dan de grenswaarde, dan is de kans op constructieve schade nihil en de kans op niet-constructieve schade acceptabel klein.*



**Figuur 2.2:** Trillingsbronnen percentage in empirische data uit (TNO, 2016c) gebruikt in de 2<sup>e</sup> herziening van de SBR Richtlijn A (SBR-A, 2017).

In **Figuur 2.2** is te zien dat de meetdata die verzameld is in (TNO, 2016c) voor 6% bestaat uit aardbevingen als trillingbron. Echter, in (TNO, 2016c) wordt genoemd dat vanwege het ontbreken van informatie deze aardbevingsdata niet gebruikt kon worden bij de totstandkoming van bovenstaande **Tabel 2.1** met ordegrootte kansen. Over toepassing van de richtlijn voor geïnduceerde seismiciteit stelt de huidige SBR Richtlijn A (SBR-A, 2017):

*Tijdens het proces van herziening heeft vanwege de gaswinning en de daarmee gepaard gaande aardbevingen het onderwerp schade door trillingen nadrukkelijk aan belang gewonnen. Hoewel de richtlijn niet expliciet voor geïnduceerde aardbevingen is geschreven, is deze toepassing niet uitgesloten.*

Tot slot wordt genoemd dat de in de SBR Richtlijn A opgenomen grenswaarden vooral betrekking hebben op niet-constructieve schade, in (SBR-A, 2017) gedefinieerd als:

*Een vermindering van de economische waarde of van de gebruikswaarde, zoals bij scheurvorming in metselwerk, bekledingen van constructiedelen, afwerklagen of betegeling zonder dat daarbij de veiligheid van personen die zich in of nabij het bouwwerk bevinden, in gevaar komt.*

In sommige documenten, zoals (TNO, 2016) en (Hooglerarenpanel, 2021a), is de in de SBR Richtlijn A bedoelde schade geïnterpreteerd als overeenkomend met schadetoestand *EMS Grade 1* (zie bijlage A voor de definitie). Deze interpretatie is strikt genomen onjuist, want schade volgens de SBR is relatief: het gaat om verslechtering t.o.v. de beginsituatie van het gebouw:

- Was het schadevrij? Dan is *EMS Grade 1* een verdedigbare interpretatie van schade.
- Had het al schade (bijv. *EMS Grade 1*)? Dan betekent schade een verslechtering ten opzichte van die toestand, bijvoorbeeld verergering van bestaande scheurtjes binnen *EMS Grade 1* of een overgang naar *EMS Grade 2*

In de toepassing van de SBR Richtlijn A bij bouwprojecten wordt veelal een voorinspectie gedaan. Als er schade gemeld wordt kan dan bepaald worden wat de verslechtering is ten gevolge van de bouwtrillingen. Bij schade door geïnduceerde seismiciteit is in de praktijk lastiger vast te stellen wat de verslechtering is want de nulsituatie is meestal onbekend en het is ook niet altijd te achterhalen of de aangetroffen schade door seismiciteit is ontstaan of door andere oorzaken.

### Samenvatting

In de huidige SBR Richtlijn A (SBR-A, 2017) zijn de 1% kans op schade bij het bereiken van de grenswaarden en de orde grootte van de toename van de kans op schade bij overschrijding ervan gebaseerd op numerieke analyses en praktijkdata voor andere trillingsbronnen dan geïnduceerde seismiciteit. De richtlijn sluit toepassing op geïnduceerde seismiciteit echter niet uit.

## 3 Empirische kwetsbaarheidskrommen

TNO heeft drie studies uitgevoerd waarin empirische kwetsbaarheidskrommen zijn afgeleid op basis van schademeldingen na optreden van een beving en bodembewegingsmodellen (TNO, 2009; 2012; 2018). [Tabel 3.1](#) geeft een overzicht van de aardbevingen en de referenties naar de studies waarin deze gebruikt zijn voor bepalen van kwetsbaarheidskrommen.

**Tabel 3.1:** Overzicht van aardbevingen die gebruikt zijn voor het afleiden van empirische kwetsbaarheidskrommen, met het aantal beschouwde en beschadigde huizen en in welk van de drie studies deze geanalyseerd zijn.

| Plaats      | Magnitude | Jaar | Totaal aantal gebouwen* | Totaal aantal beschadigde gebouwen* | studie           |
|-------------|-----------|------|-------------------------|-------------------------------------|------------------|
| Roswinkel   | 3.4       | 1997 | 20443                   | 171                                 | (TNO 2009, 2018) |
| Roswinkel   | 3.2       | 1998 | 20443                   | 127                                 | (TNO 2009, 2018) |
| Hoeksmeer   | 3.0       | 2003 | 30283                   | 5                                   | (TNO 2009, 2018) |
| Stedum      | 3.0       | 2003 | 30283                   | 40                                  | (TNO 2009, 2018) |
| Westeremden | 3.5       | 2006 | 30283                   | 219                                 | (TNO 2009, 2018) |
| Huizinge    | 3.6       | 2012 | NA**                    | NA**                                | (TNO, 2013)      |

\* dit aantal omvat 4 typen gebouwen: boerderijen voor en na 1940, en laagbouw voor en na 1940

\*\* Voor Huizinge was ten tijde van de studies slechts klein deel van de schadeclaims al toegekend. De (TNO, 2013) studie heeft zich gebaseerd op het percentage toegekende claims en zo het totaal beschouwd, in (TNO, 2018) werd dit niet voldoende nauwkeurig beschouwd vanwege de kleine fractie toegekende claims en is Huizinge niet meegenomen in de analyse

Hierna wordt ingegaan op de, in de context van dit rapport, voornaamste resultaten van ieder van de drie studies.

### 3.1 Empirische kwetsbaarheidskrommen, directe aanpak (TNO, 2009)

In de eerste studie (TNO, 2009) zijn de kwetsbaarheidskrommes bepaald via een directe aanpak, door het aantal huizen met toegekende schademeldingen te delen door het totaal aantal huizen voor een serie ringen op afstanden van het epicentrum, waarbij iedere ring een vast aantal huizen bevat. Het gebruikte aantal huizen per ring is gegeven in [Tabel 3.2](#). De gebouwen zijn onderverdeeld in 4 categorieën: boerderijen voor 1940, boerderijen na

1940, laagbouw voor 1940, laagbouw na 1940. Deze splitsing is gemaakt omdat bij metselwerk voor 1940 veelal kalkmortel gebruikt werd en na 1940 cementmortel.

**Tabel 3.2:** Gebruikte aantal huizen per ring voor het bepalen van kwetsbaarheidskrommen in studies (TNO, 2009, 2012)

| Gebouwcategorie       | Aantal huizen per ring |
|-----------------------|------------------------|
| Boerderijen voor 1940 | 100                    |
| Boerderijen na 1940   | 100                    |
| Laagbouw voor 1940    | 500                    |
| Laagbouw na 1940      | 1000                   |

De kwetsbaarheidskrommen in (TNO, 2009) werden als volgt bepaald:

- **Definitie van de ringen:** De eerste ring is een cirkel rondom het epicentrum die het vastgestelde aantal huizen bevat (bijvoorbeeld 100 boerderijen van vóór 1940). De tweede ring loopt vanaf deze cirkel tot de volgende, die opnieuw hetzelfde aantal huizen bevat, enzovoort.
- **Berekening van de schadekans:** Voor elke aardbeving in [Tabel 3.1](#) wordt voor elk van de 4 gebouwtypen de set ringen geconstrueerd en de schadekans berekend. Dit werd gedaan door het aantal schademeldingen voor de huizen in die ring te delen door het totaal aantal huizen in dezelfde ring.
- **Berekening van de trillingsnelheid:** Voor elke aardbeving in [Tabel 3.1](#) wordt voor elk van de 4 gebouwtypen per ring de gemiddelde trillingsnelheid berekend op basis van het bodembewegingsmodel gepresenteerd in [Figuur 3.1](#).
- **Kwetsbaarheidskromme:** Per gebouwtype wordt de berekende kans op schade per ring geplot tegen de trillingsnelheid. De uiteindelijke kwetsbaarheidskromme is een curve die werd gefit door de punten.

$$\log V_h(R) = -1.83 + \log(OS) + 0.74M - 0.00139\sqrt{(d^2 + R^2)} - 1.33 \log\left(\sqrt{(d^2 + R^2)}\right)$$

Waarbij:

$\log$  =  $^{10}\log$

$R$  = afstand tot het epicentrum [km],

$d$  = diepte van het hypocentrum [km],

$M$  = magnitude van de aardbeving [-],

$V_h$  = peak ground velocity of pvg [cm/s],

$OS$  = opslingerfactor voor de ondergrond [-].

**Figuur 3.1:** Bodembewegingsmodel van (KNMI, 2007) gebruikt met opslingerfactor  $OS=1$  in (TNO, 2009, 2012).

Volgens de studie (TNO, 2009) zijn de grenswaarden voor de trillingsnelheid in de SBR Richtlijn A (SBR-A, 2002) vergelijkbaar met de in de kwetsbaarheidskrommen gevonden trillingsnelheden bij 1% kans op schade (de waarden zijn opgenomen in [Tabel 3.3](#) in de volgende paragraaf). Het woningtype "boerderij" blijkt het gevoeligst voor schade door aardbevingen en de gevonden trillingsnelheid werd vergelijkbaar geacht met de grenswaarden voor categorie 3 in de (SBR-A, 2002) voor monumentale of in slechte staat verkerende metselwerkgebouwen.

Er zijn met de kennis van nu een aantal kanttekeningen te plaatsen bij deze conclusie:

1. Het bodembewegingsmodel geeft het geometrisch gemiddelde van de snelheid en niet het maximum van de drie richtingen van de snelheid (twee horizontale en één verticale) zoals de  $V_{top}$  waarde van de (SBR-A, 2002). De  $V_{top}$  waarde ligt hoger dan het geometrisch gemiddelde. Een kwetsbaarheidskromme in termen van  $V_{top}$  zou tot lagere schadekansen leiden.
2. Het snelheidsniveau uit het bodembewegingsmodel is direct vergeleken met de grenswaarden van de (SBR-A, 2002). De partiële veiligheidsfactor 1.6 voor de indicatieve meting is hierbij niet in rekening gebracht. Het meenemen van deze factor leidt waarschijnlijk tot lagere schadekansen.
3. De keuze van de ringen heeft een duidelijke invloed op de berekening voor de kans op schade als functie van het trillingsniveau, zie (TNO, 2018).
4. Het gebruikte KNMI bodembewegingsmodel in [Figuur 3.1](#) is uit 2007. Dit was voor de uitbreiding van het KNMI sensor netwerk. Verwacht wordt dat de meer recente bodembewegingsmodellen die op meer data gebaseerd zijn tot nauwkeuriger voorspellingen leiden.
5. De kans op schade is berekend voor de gemiddelde snelheid volgens het bodembewegingsmodel voor de gebouwen in een ring. Deze wordt vervolgens toegekend aan alle gebouwen in de ring. Verder zijn geen onzekerheden in het bodembewegingsmodel beschouwd in deze berekening.

In (TNO, 2023) wordt uitgebreid ingegaan op 1) en 2): hoe trillingen vanuit de bodem aangrijpen op het gebouw, de vergelijking met de indicatieve metingen uit de SBR Richtlijn A en het verschil tussen de  $V_{top}$  en de PGV zoals die in de oudere bodembewegingsmodellen gedefinieerd is via het geometrisch gemiddelde. Punt 5) werd onderzocht in (TNO, 2018) en wordt verderop in dit hoofdstuk besproken.

## 3.2 Empirische kwetsbaarheidskrommen met directe aanpak voor de Huizinge beving (TNO, 2013)

De studie (TNO, 2013) gebruikt dezelfde methode om kwetsbaarheidskrommen te berekenen toegepast op de aardbeving in Huizinge 2012. De huizen leken nu bij lagere trillingssnelheden schade op te lopen dan bij (TNO, 2009). Echter er werd geobserveerd dat de verwachtingswaarde van het (KNMI, 2007) bodembewegingsmodel, zie [Figuur 3.1](#), nu duidelijk lager lag dan de gemeten trillingsniveaus met name op kortere afstand van het epicentrum. Ten tijde van de studie waren er 320 schadeanalyses beschikbaar, 15% van totaal 2085 meldingen. Van deze 320 werden er 4 afgewezen. Omdat dit zo'n laag percentage is, werd in de studie aangenomen dat alle 2085 schademeldingen toegekend zijn.

In het document is ook de ernst van de schade onderzocht binnen het raamwerk van de European Macroseismic Scale (EMS, 1998), zie bijlage A voor definities. Uit de 320 schadeanalyses van de expertisebureaus volgde dat ca 32% van de schademeldingen in *EMS Grade 1* vielen en 68% in *EMS Grade 2*. Echter geen van de schades toegekend aan *EMS Grade 2* was zo ernstig als de (EMS, 1998) beschrijving, zie bijlage A. Het rapport concludeert dat deze 68% buiten *EMS Grade 1* vallen maar eigenlijk ook niet in *EMS Grade 2* horen. Er ontbreekt een verdere verfijning.

In de analyses van de 320 schademeldingen concludeert (TNO, 2013) ook dat in ongeveer 50% van de gevallen het nieuwe scheuren betreft in huizen die eerder geen schade hadden. De andere 50% van de huizen hadden al schade en soms diepere scheuren (3% van de gevallen). In 20% van de huizen die schade hadden is de schade uitsluitend het verergeren van bestaande scheuren, in de andere gevallen betreft het ook de ontwikkeling van nieuwe scheuren. Deze observatie sluit aan bij die in hoofdstuk 2: schade volgens de SBR Richtlijn A (SBR-A, 2017) kan alleen gezien worden in termen van een specifieke toestand bijvoorbeeld, *EMS Grade 1*, als het gebouw voorafgaand aan de beving schadevrij was. In de andere gevallen, die volgens (TNO, 2013) net zo vaak voorkomen, moet een maat gevonden worden voor de verergering van schade en volstaat een specifieke schadetoestand niet.

### 3.3 Empirische kwetsbaarheidskrommen op basis van Bayesiaanse aanpak (TNO, 2018)

In deze studie is een meer rigoureuze aanpak gevolgd om kwetsbaarheidskrommen af te leiden voor schade op basis van dezelfde data als gebruikt in (TNO, 2009). Twee aanpassingen zijn hiervoor gemaakt. De eerste is dat in plaats van het 2007 KNMI bodembewegingsmodel nu het bodembewegingsmodel, de *Empirical Ground Motion Prediction Equations* (Bommer et al, 2017), gebruikt is. De tweede is dat in plaats van het onderverdelen in ringen een Bayesiaanse aanpak gebruikt is die locatie van individuele huizen zowel als de onzekerheden van het bodembewegingsmodel in rekening brengt.

Ook in deze studie zijn de conclusies uitsluitend bepaald voor het geometrisch gemiddelde van de snelheid en niet het maximum van de drie richtingen van de snelheid (twee horizontale en één verticale) zoals de  $V_{top}$  waarde van de (SBR-A, 2017). Dit is gedaan om het resultaat te vergelijken met (TNO, 2009). Er zijn wel een aantal andere intensiteitsmaten van de snelheid bekeken die gegeven zijn in (Bommer et al, 2017), maar de resultaten in termen van kwetsbaarheidskrommen zijn niet beschreven.

In de studie zijn het (KNMI, 2007) bodembewegingsmodel en het (Bommer et al, 2017) model vergeleken, beide met de Bayesiaanse aanpak, en er zijn geen wezenlijke verschillen gevonden. [Tabel 3.3](#) laat zien dat in de studie wordt gevonden dat de 1% schadekans bereikt wordt bij lagere berekende trillingsniveaus dan in (TNO, 2009). Dit is voornamelijk het gevolg van de Bayesiaanse aanpak waar ook de onzekerheid van het bodembewegingsmodel in verwerkt is versus de ringen aanpak die gebruikt maakte van de verwachtingswaarde van de bodembeweging.

**Tabel 3.3:** Trillingssnelheden (Geometrisch gemiddelde) bij 1% kans op schade in (TNO, 2009) en (TNO, 2018)

| gebouwtype               | Trillingssnelheid bij 1% kans op schade (TNO, 2009) [mm/s] | Trillingssnelheid bij 1% kans op schade (TNO, 2018) [mm/s] |
|--------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Boerderij voor 1940      | 2,4*                                                       | 1,9                                                        |
| Boerderij na 1940        | 2,4*                                                       | 2,1                                                        |
| Laagbouwwoning voor 1940 | 3,3                                                        | 3,1                                                        |
| Laagbouwwoning na 1940   | 5,8                                                        | 5,5                                                        |

\* in (TNO, 2009) zijn de boerderijen voor 1940 en na 1940 samengevoegd.

De trillingsniveaus in [Tabel 3.3](#) kunnen niet direct vergeleken worden de SBR Richtlijn A grenswaarden (SBR-A, 2017) vanwege de volgende redenen:

1. Het bodembewegingsmodel geeft het geometrisch gemiddelde van de snelheid en niet het maximum van de drie richtingen van de snelheid (twee horizontale en één verticale) zoals de  $V_{top}$  waarde van de (SBR-A, 2017). De  $V_{top}$  waarde ligt hoger dan het geometrisch gemiddelde. Een kwetsbaarheidskromme in termen van  $V_{top}$  zou tot lagere schadekansen leiden.
2. Het snelheidsniveau uit het bodembewegingsmodel is direct vergeleken met de grenswaarden van de (SBR-A, 2002). De partiële veiligheidsfactor 1.6 voor de indicatieve meting is hierbij niet in rekening gebracht. Het meenemen van deze factor leidt waarschijnlijk tot lagere schadekansen.
3. Het toen gebruikte bodembewegingsmodel, de *Empirical Ground Motion Prediction Equations* (Bommer et al, 2017), was nog gebaseerd op de KNMI meetdata met calibratiefout. Eind 2018 is dit gecorrigeerd (Ntinalexis et al 2019), (SODM, 2021). Inmiddels zijn updates van deze bodembewegingsmodellen beschikbaar, (Bommer et al, 2021) en (KMNI, 2020).

Het wordt aanbevolen om de (TNO, 2018) analyses te herhalen op basis van de gecorrigeerde bodembewegingsmodellen en dan bij voorkeur ook direct de verticale component van de bodembeweging mee te nemen (punt 1) en rekening te houden de partiële factor (punt 2). De snelheidsniveaus bij de 1% schadekans uit deze kwetsbaarheidskrommen kunnen vergeleken worden met de grenswaarden uit de SBR Richtlijn A en kunnen ook gebruikt worden als validatie van numerieke modellen voor andere schadekansen.

## 4 Numeriek onderzoek naar kwetsbaarheidskrommen

Het afleiden van kwetsbaarheidskrommen voor schade via numerieke modellen gebeurt met eindige-elementenberekeningen (FEM). Op de meest gedetailleerde schaal omvat dit het 3D-modelleren van gebouwen met variaties in geometrische en materiële eigenschappen, gefundeerd op een bodem met eveneens variërende eigenschappen. De bodem wordt daarbij aangestoten door een trillingsbron met variaties in intensiteit, afstand en trillingsvorm. Al deze variaties worden gemodelleerd via stochasten die zoveel mogelijk gebaseerd zijn op waargenomen data. Door sampling worden realisaties getrokken, en voor elke realisatie wordt een berekening uitgevoerd en wordt de schadetoestand vastgesteld, bij voorkeur samengevat in een enkel getal, hier schademaat genoemd. Vervolgens kan de kans op schade (de overschrijdingskans van een vastgelegde schademaat) worden bepaald als functie van het trillingsniveau aan de fundering van het gebouw. Dit trillingsniveau wordt eveneens uit de berekeningen gehaald. Op deze manier ontstaat de kwetsbaarheidskromme.

In dit hoofdstuk wordt het TNO onderzoek naar het bepalen van kwetsbaarheidskrommen voor schade met FEM-analyses beschreven. Paragraaf 4.1 bespreekt de studies op basis van 2D-modellen (van wanden), die gebruikt zijn in de herzieningen van de SBR Richtlijn A (SBR-A, 2002, 2017). Deze studies omvatten geen aardbevingen als trillingsbron en kennen beperkingen, zoals de aanname van elastisch materiaalgedrag. Hier wordt later op ingegaan.

Paragraaf 4.2 behandelt het TNO onderzoek binnen het AGE bovengrond programma, waarin 3D-analyses (gehele gebouwen) zijn uitgevoerd voor verschillende trillingsbronnen, eerst met lineaire modellen en later met niet-lineaire modellen die schadeontwikkeling beschrijven. Dit laatste onderzoek is nog niet afgerond; de openstaande vragen worden toegelicht.

### 4.1 Kwetsbaarheidskrommen met 2D modellen

Het eerste onderzoek van TNO naar numeriek bepaalde kwetsbaarheidskrommen voor schade door trillingen werd beschreven in (TNO, 1997). Ter controle van dit onderzoek voerde TNO in het kader van de herziening van de SBR Richtlijn A (SBR-A, 2017) een heranalyse uit (TNO, 2016b). Daarnaast werd een verfijning uitgevoerd waarbij trillingsbelasting gebaseerd was op metingen tijdens heien en het intrillen van damwanden (TNO, 2017).

Zoals beschreven in hoofdstuk 2, richtten deze studies zich vooral op het verkrijgen van inzicht in de kans op schade bij overschrijding van de grenswaarden van de SBR Richtlijn A. Dit inzicht werd gebaseerd op zowel empirische data als numerieke analyses. Hoewel de berekeningen deels aansloten bij de empirische data, was de ordegrootte tabel ([Tabel 2.1](#))

met kansen op schade die in SBR-Richtlijn A (SBR, 2017) is weergegeven, grotendeels gebaseerd op empirische waarnemingen.

De volgende beperkingen werden in deze 2D studies vastgesteld:

1. De berekeningen zijn uitgevoerd met een 2D eindige elementenmodel van een muur met een raamopening, de trillingen vinden alleen in het vlak plaats van de muur, buiging van de muur is niet beschouwd. Omdat dit alleen een enkele wand betreft is het moeilijk uitspraken te doen over een gebouw als geheel.
2. De bodem en grond-constructie interactie zijn sterk vereenvoudigd gemodelleerd. Het is onduidelijk wat het effect hiervan is.
3. Het materiaalgedrag is lineair elastisch en de methode die gebruikt wordt voor het bepalen of er schade is betreft een controle van het overschrijden van de trekspanning die correspondeert met scheurinitiatie in een element. Hiermee kan alleen scheurinitiatie bepaald worden, dit zijn zeer kleine nog onzichtbare scheuren die niet representatief zijn voor de schade zoals bedoeld in de SBR Richtlijn A. Daarnaast kan de ontwikkeling van scheuren niet goed gesimuleerd worden, dat wil zeggen de toename van schade bij hogere trillingsniveaus of het toenemen van schade bij bestaande schade. Slechts het aantal elementen dat het trekspanning criterium overschrijdt is te tellen, maar er kan geen uitspraak gedaan worden over de toename van scheurbreedte bij de mate van overschrijding.

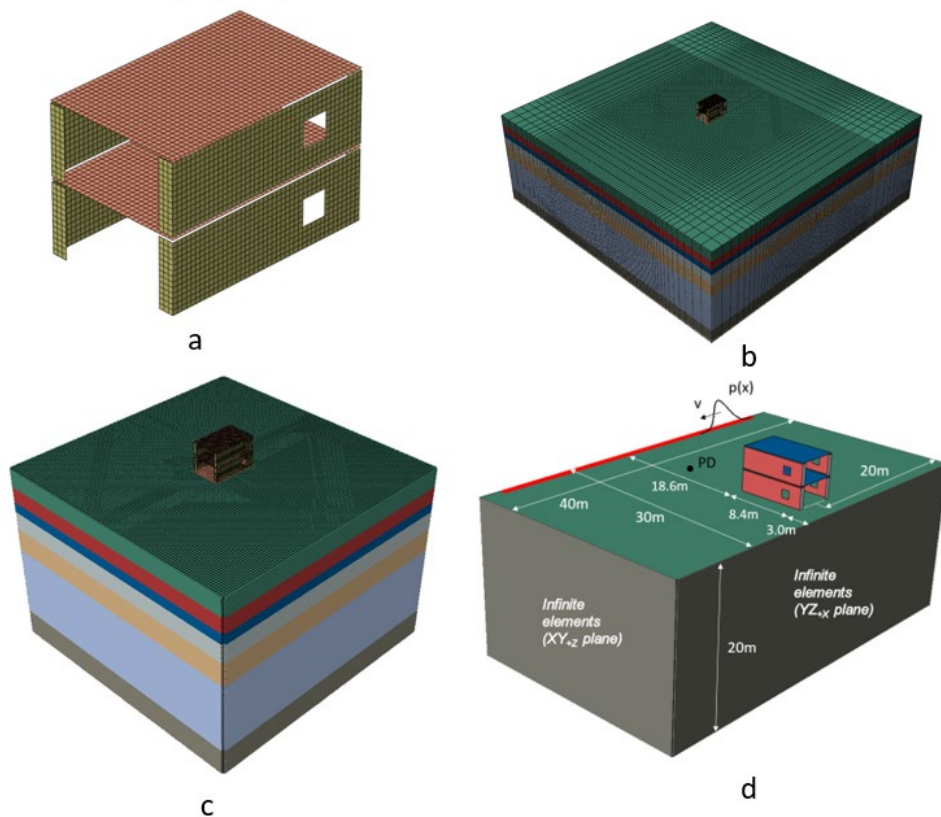
Bovendien bevatte geen van de drie studies analyseerde aardbevingen als trillingsbron.

## 4.2 Kwetsbaarheidskrommen met 3D modellen

In het AGE bovengrond programma naar kwetsbaarheid van gebouwen ligt de focus op het bepalen voor kwetsbaarheidskrommen voor schade als gevolg van geïnduceerde seismiteit. In het onderzoek is eerst aandacht geschonken aan het doorrekenen van aardbevingen als trillingsbron en het aanpakken van de beperkingen 1) en 2) genoemd in paragraaf 4.1. Een tussentijds resultaat van dit onderzoek voor het heien van palen en aardbevingen als trillingsbron is beschreven in het interne rapport (TNO, 2020). Dit werd in het jaar daarop aangevuld met treintrillingen (TNO, 2021). In deze studies werd nog elastisch materiaalgedrag gebruikt, met dezelfde beperking als benoemd onder 3) in paragraaf 4.1. Dit betekent dat schade hier nog onzichtbare schade is, de initiatie van scheuren. Een vergelijking tussen de verschillende trillingsbronnen in kwalitatieve zin is wel uitgevoerd.

**Figuur 4.1** toont de opzet van het gebouwmodel en de modellen voor de bodem (het grondblok) gebruikt in (TNO, 2020; 2021). Het gebouwmodel is hier nog een vereenvoudigd type gebouw bestaande uit een 3D versie van het 2D model uit de studies in paragraaf 4.1. Dezelfde muur is in de studie 4x gebruikt om een eerste verdieping en tweede verdieping te genereren. Vloeren zijn gemodelleerd en er is voor gezorgd dat de dynamische massa realistisch is. Dit gebouwmodel lost punt 1) uit paragraaf 4.1 grotendeels op. De aardbevingstrilling is onderaan het grondblok (**Figuur 4.1 b**) opgelegd en het model is groter om randeffecten te elimineren. De heitrillingen zijn langs een verticale lijn in de bodem opgelegd op verschillende afstanden van het gebouw, het model (**Figuur 4.1 c**) heeft absorberende randen zodat de hei-energie niet terug reflecteert. Voor treintrillingen (**Figuur 4.1 d**) is een symmetrie-as geïntroduceerd waarlangs de trein rijdt en het grondblok heeft eveneens absorberende randen. De verschillende trillingsbronnen grijpen via de bodem

verschillend aan op het gebouw en de grond-constructie interactie is met het modelleren van een volledig grondblok goed gemodelleerd wat punt 2) uit paragraaf 4.1 oplost.

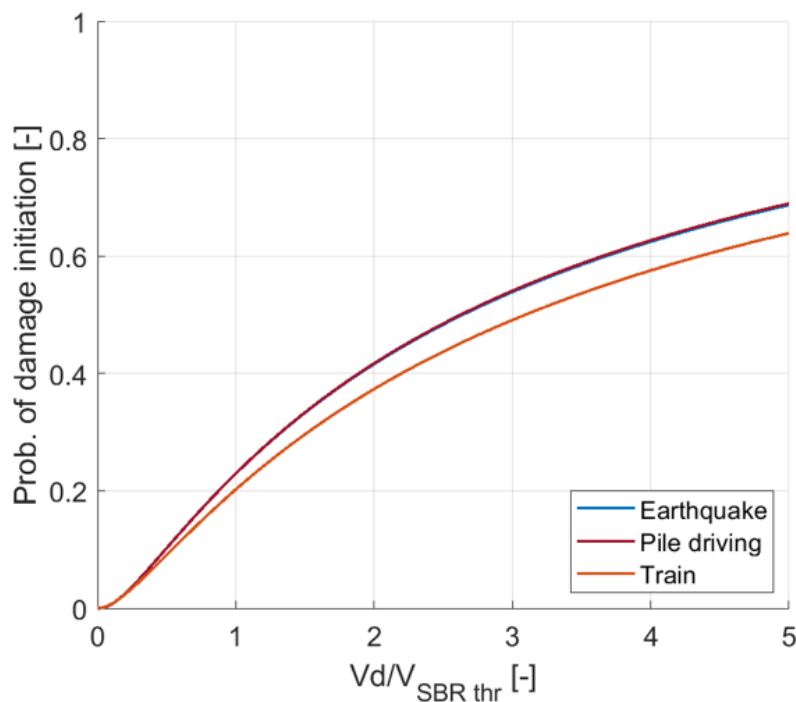


**Figuur 4.1:** Gebruikte gebouwmodel (a) en grondblok voor aardbevingen (b), heien (c) en treinverkeer (d) in de simulaties uit (TNO, 2020, 2021).

In de simulaties was goed zichtbaar hoe de verschillende golven zich voortplanten en naar het gebouw overgedragen worden. De aardbevingsgolf plantte zich van onder naar het maaiveld en het gebouw werd eerst verticaal aangestoten met een drukgolf en vervolgens horizontaal met de schuifgolf. De buigmode van het gebouw die ontstaat door deze horizontale aanstoting, waarvan niet mogelijk is deze te modelleren met de 2D studies, werd hier goed zichtbaar. Voor het heien was goed zichtbaar dat de trilling zich van de heilocatie naar het gebouw voortplant, en dus het gebouw in eerste instantie meer aan één zijde aanstoot. Zowel de diepere trilling, de drukgolf vanaf paalpunt naar het oppervlak, als de oppervlaktegolf werd zichtbaar. Het gebouw komt ook meer lokaal in trilling, dan in het geval van de aardbevingen. Bij de treintrilling was zichtbaar hoe de trilling zich langs het maaiveld voortbeweegt vanwege de rijdende trein en dan grotendeels via een oppervlaktegolf naar het gebouw voortplant en het gebouw aanstoot voornamelijk aan de zijde het dichtst bij het spoor. Het niveau van realisme van de trillingsvormen is hiermee sterk vergroot in vergelijking met de eerdere 2D studies. In (TNO, 2021) is een vergelijking gemaakt tussen het numerieke model en semi-analytische oplossingen voor golfvoortplanting om te garanderen dat het bodemmodel voldoende goed functioneert.

Een groot aantal simulaties is uitgevoerd met de drie modellen waarbij de trillingsbron gevarieerd is (variatie in treinen, bevingen en hei-pulsen) en gebouwparameters gevarieerd zijn (met name stijfheid). Vervolgens zijn per simulatie de spanningen in de muren getoetst aan het criterium voor scheurinitiatie. Dit criterium is eveneens gemodelleerd als stochast

voor de sterkte van het metselwerk. Kwetsbaarheidskrommen zijn vervolgens bepaald als functie van de pieksnelheid aan de fundering:  $V_{top}$ . Omdat in de SBR Richtlijn A er verschillende partiële factoren bestaan voor de trillingsbronnen door de duur en door de frequentie-inhoud zijn deze vervolgens in rekening gebracht en werd zo de  $V_d$  waarde bepaald. Voor aardbevingen is dit gedaan onder de aanname dat de SBR Richtlijn A zou gelden voor aardbevingen. Dan volgen op natuurlijke wijze de partiële factoren uit (SBR-A, 2017). Dit is beschreven in TNO (2023). Deze  $V_d$  waarde is vervolgens gedeeld door de grenswaarde van de trilling voor goed metselwerk en de kwetsbaarheidskrommen zijn met elkaar vergeleken, zie [Figuur 4.2](#).



**Figuur 4.2:** Vergelijking van kwetsbaarheidskrommen bepaald met studies (TNO, 2020, 2021) na schaling met de (SBR-A, 2017) partiële factoren en frequentie-inhoud voor iedere trillingsbron.

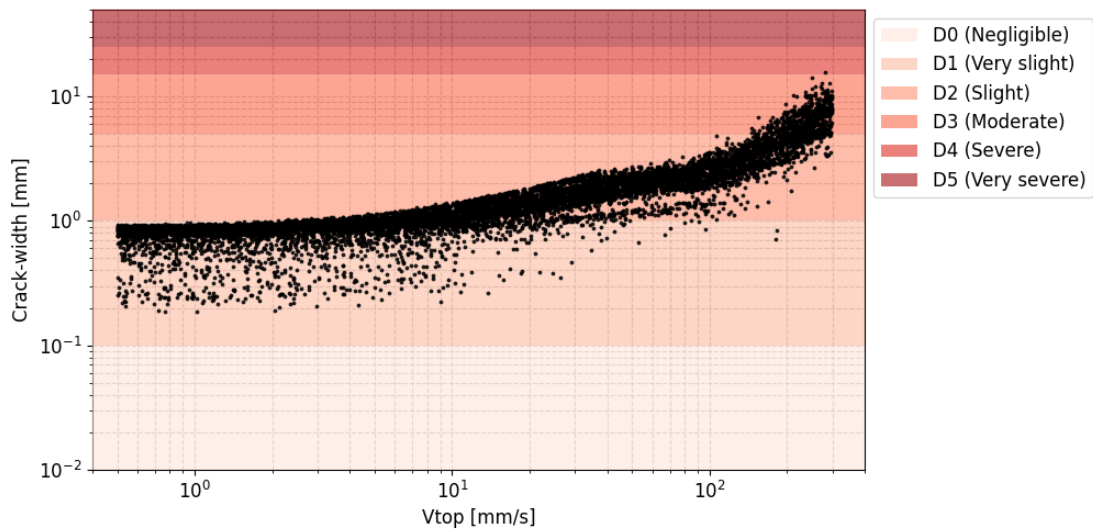
Te zien is dat de kwetsbaarheidskrommen vrij dicht bij elkaar liggen en dat de krommen van heien en aardbevingen vrijwel over elkaar liggen. Dit suggereert dat Aardbevingen behandeld zouden kunnen worden met de (SBR-A, 2017) zonder aanpassing van de partiële factoren. Echter is ook te zien dat de kans op schade bij de grenswaarde ( $V_d/V_{SBR\ thr} = 1$ ) rond de 20% ligt in plaats van de in SBR-A gegeven waarde van 1%. Dit is omdat deze kwetsbaarheidskrommen voor scheurinitiatie zijn, onzichtbare haarscheurtjes, en niet voor de schadeklasse DS1. Zelfs als een enkel haarscheurtje in de simulaties aanwezig is omdat in een element net de kritische spanning bereikt wordt, telt dit als schade, waarbij dit in de praktijk niet herkend wordt en dus ook niet als zodanig opgemerkt. Dit is het resultaat van het gebruik van een elastische berekening, beperking 3) zoals besproken in paragraaf 4.1.

Om dit op te lossen dienen niet-lineaire materiaalmodellen voor metselwerk toegepast te worden. Parallel aan het werk voor schade heeft TNO ook onderzoek verricht naar veiligheid en instorten van gebouwen in het AGE bovengrond programma. Hierbij zijn ook niet-lineaire materiaalmodellen gebruikt in zeer gedetailleerde FEM modellen die veel rekenkracht vergen. In de context van dit rapport wordt genoemd dat in TNO (2018b) berekeningen zijn uitgevoerd voor een metselwerkgebouw met de software Abaqus FEA met als

materiaalmodel het concrete damage plasticity model. In TNO (2019) zijn berekeningen uitgevoerd aan een metselwerk rijtjeshuis met de software LS-Dyna waarbij gebruikt is gemaakt van een metselwerkmateriaalmodel ontwikkeld door Arup in opdracht van NAM dat voor deze studie beschikbaar was gesteld aan TNO. Omdat het Concrete damage plasticity model niet zo geschikt bleek voor metselwerk en het LS-Dyna materiaalmodel om eigendomsrechtelijke redenen niet kan worden gebruikt in andere projecten is later gebruik gemaakt van de software (DIANA, 2017) en het Engineering Masonry Model (EMM). Dit materiaalmodel is oorspronkelijk door de TU Delft ontwikkeld en gebruikt voor de berekening van schade door bodemdaling en aardbevingen (TuDelft 2021, 2022, 2024). In TNO (2022) zijn benchmark berekeningen gemaakt voor een algemeen gebouw om te bepalen dat het materiaalgedrag inderdaad geschikt is voor deze toepassing en dit model is sindsdien gebruikt.

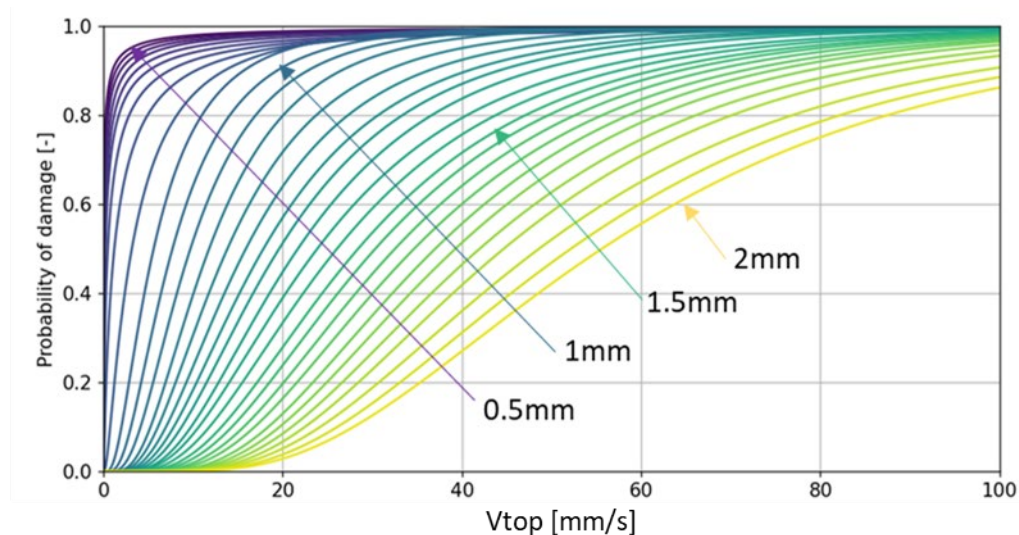
In (TNO, 2023) is DIANA gebruikt om kwetsbaarheidskrommen te bepalen voor hetzelfde gebouw (Figuur 4.1, a) maar nu met het niet-lineaire EMM materiaalmodel. Hierbij is gebruik gemaakt van cloud-computing en zijn 10.000 simulaties met DIANA uitgevoerd binnen een tijdsbestek van twee weken. Helaas was het met de impliciete rekenmethode in DIANA niet mogelijk om modellen van de bodem door te rekenen van het detailniveau zoals in (Figuur 4.1b,c,d) omdat het aantal vrijheidsgraden om de hogere frequenties vereist in de SBR Richtlijn A te kunnen beschrijven te groot was. Omdat het grondvlak van het gebouw in de aardbevingssimulaties (Figuur 4.1, a) relatief als star lichaam bewoog kon voor aardbevingen toch een eenvoudige en werkbare oplossing gevonden worden. Hierbij is in DIANA het gebouw (Figuur 4.1, a) gemodelleerd, zonder bodem. In Abaqus FEA zijn voor een elastisch gebouw dezelfde aardbevingssimulaties opgelegd als gebruikt in (TNO, 2020) waarbij de beweging aan de fundering is geëxtraheerd en is opgelegd in het DIANA gebouwmodel. Het idee hierbij is dat kleine scheurtjes (zeer lichte schade) het algehele dynamisch gedrag van een gebouw nauwelijks veranderen en dat de grond-constructie interactie niet significant verandert zolang de schade licht is. Dit liet toe om de grond-constructie interactie goed te beschrijven. Voor de andere trillingsbronnen was deze oplossing niet mogelijk vanwege het complexe bewegingspatroon van het grondvlak van het gebouw door de hiervoor beschreven asymmetrische aanstoting van het gebouw vanuit de bodem. Daarom is in (TNO, 2023) het effect van het EMM-materiaalmodel alleen geëvalueerd voor aardbevingen.

Het EMM-materiaalmodel kan de ontwikkeling van scheurvorming beschrijven en de maximale scheurbreedte is in de studie gebruikt als maat voor schade. Dit is een enkel getal, goed te bepalen uit de simulaties en het is ook een continue maat voor schade, een grotere scheurbreedte is ergere schade. In Burland et al (1977) zijn *degrees of damage* gedefinieerd in termen ranges van maximale scheurbreedte aangeduid met D0, D1, etc., zie bijlage A voor de definities. Figuur 4.3 toont de maximale scheurbreedte voor de 10.000 simulaties, met in kleuren de *degree of damage* classificatie. Opgemerkt wordt dat binnen het raamwerk van de eerder genoemde EMS *Damage Grades* er geen continue schaal mogelijk, noch is schade te vangen in een enkel getal. De *degrees of damage* (Burland et al, 1977) is ook een veel gebruikte schademaat en vanwege de continue schaal geschikter voor dit onderzoek. In Bijlage A zijn deze twee schadematen in meer detail beschreven. Toch geeft de scheurbreedte alleen niet een volledig beeld van schade omdat het effect van scheurlengte en het aantal scheuren bijvoorbeeld ook een rol speelt. Verderop wordt hier nader op ingegaan.



**Figuur 4.3:** Maximum scheurwijdte uit de aardbevingssimulaties uitgezet tegen de pieksnelheid aan de fundering ( $V_{top}$ ). De kleurcodering van schade is afkomstig uit (Burland et al, 1977).

Uit deze 10.000 berekeningen zijn kwetsbaarheidskrommen bepaald, zie **Figuur 4.4**. De kwetsbaarheidskrommen zijn gegenereerd door een maximum scheurbreedte te kiezen, bijvoorbeeld 1mm en dan de kans te bepalen dat deze scheurbreedte overschreden wordt. In de **Figuur 4.4** zijn zo kwetsbaarheidskrommen weergegeven voor scheurbreedtes van 0.5 mm tot 2 mm met intervallen van 0.05 mm.



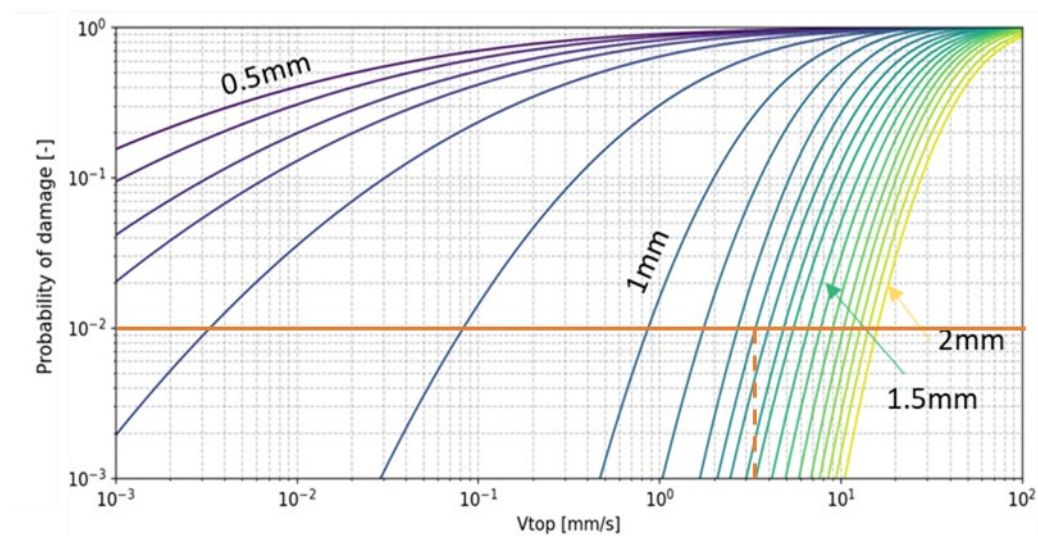
**Figuur 4.4:** Kwetsbaarheidskrommen bepaald uit de 10.000 aardbevingssimulaties met het Engineering Masonry Model in DIANA, (TNO, 2023).

De vraag is welke scheurbreedte overeenkomt met schade volgens de SBR Richtlijn A. Het oorspronkelijke idee van de studie (TNO, 2020) was om deze simulaties ook uit te voeren voor heien en mogelijk treinverkeer, omdat deze trillingsbronnen expliciet worden genoemd in de SBR Richtlijn A. Het doel was om voor deze bronnen een scheurbreedte te bepalen die een 1% kans op schade oplevert (**Tabel 2.1**) bij een  $V_{top}$  die overeenkomt met de grenswaarde in de SBR Richtlijn A. Deze scheurbreedte zou vervolgens worden gebruikt om een kwetsbaarheidskromme voor aardbevingen te bepalen, waarmee inzicht wordt

verkregen in de schadekans als de SBR Richtlijn A zonder aanpassingen wordt toegepast. Als deze kans afwijkt van 1% kan met deze methode een partiële factor voor aardbevingen worden afgeleid.

Vanwege de eerder genoemde beperkingen in het modelleren van het grondblok, bleek het echter niet mogelijk om op dezelfde manier als in (TNO, 2020) treintrillingen en heien in DIANA te simuleren. Daarom zijn vooralsnog alleen aardbevingssimulaties gedaan en is het onduidelijk welke scheurbreedte gehanteerd moet worden als SBR Richtlijn A schadecriterium.

Het probleem is voor nu omgekeerd aangepakt: Onder de aanname dat de SBR Richtlijn A geldt voor aardbevingen kan op basis van [Figuur 4.4](#) vastgesteld worden voor welke scheurbreedte als maat voor schade, de schadekans 1% is bij het bereiken van de grenswaarde. Als goed metselwerk verondersteld wordt, dan is de grenswaarde uit de SBR Richtlijn A 5 mm/s. Voor een indicatieve metingen moet een factor 1,6 in rekening gebracht worden. Dit verlaagt effectief de toelaatbare trilling naar  $5/1,6 = 3,125$  mm/s. [Figuur 4.5](#) (een weergave van [Figuur 4.4](#) op log schaal) toont grafisch hoe nu 1,15 mm scheurbreedte wordt afgeleid als maat voor schade die voor aardbevingen past bij de SBR Richtlijn A. Dit is de kwetsbaarheidskromme die 1% kans op schade bereikt bij een snelheid van 3,125 mm/s. In de studie is deze 1,15 mm direct numeriek bepaald.



**Figuur 4.5:** Afleiding van de scheurbreedte voor aardbevingen voor goed kwaliteit metselwerk, (TNO, 2023). De 1% schadekans is weergegeven in oranje en de lijn bij  $V_{top} = 3,125$  mm/s voor goed kwaliteit metselwerk is weergegeven als een onderbroken oranje lijn, het snijpunt ligt op de kwetsbaarheidskromme bij scheurbreedte 1,15 mm.

Deze 1,15 mm maximum scheurbreedte ligt net buiten de (Burland et al, 1977) D1 *degree of damage*, onderin D2. Dit is enigszins vergelijkbaar met de *EMS Grade 1* volgens de beschrijvingen in Bijlage A en deze is volgens Hoofdstuk 2 een verdedigbare interpretatie is voor SBR Richtlijn A schade. De volgende beperkingen in de studie moeten echter nog onderzocht worden voordat conclusies getrokken kunnen worden:

1. Alleen aardbevingen zijn beschouwd als trillingsbron. Alleen met het beschouwen van tenminste één andere trillingsbron waarvoor de SBR Richtlijn A van toepassing is (zoals heien) kan vastgesteld worden of de SBR Richtlijn aangepast moet worden voor geïnduceerde seismiciteit.

2. De kwetsbaarheidskrommen zijn afgeleid voor een absolute schademaat. In [Figuur 4.3](#) is te zien dat er al schade is bij zeer lage trillingssnelheden. Dit is de schade die in de berekeningen ontstaat door het aanbrengen van eigengewicht en in de praktijk kan zijn ontstaan door andere factoren niet gerelateerd aan geïnduceerde seismiciteit. In hoofdstuk 2 is besproken dat schade in de SBR Richtlijn A ook betrekking heeft op het verergeren van bestaande schade.

Dit zijn essentiële punten die nader onderzocht moeten worden. Andere verbeterpunten voor het model zijn het meer realistisch modelleren van het gebouw en als variaties niet alleen materiaaleigenschappen, maar ook geometrie mee te nemen (zoals de grote van deur- en raamopeningen en de locatie van deze openingen). De grond-constructie interactie is vereenvoudigd in de huidige modellering, het modelleren van een volledig grondblok is vereist voor het doorrekenen van trillingsbronnen anders dan aardbevingen die het gebouw meer asymmetrisch aanstoten (zie ook punt 1 hierboven).

In het kader van punt 2 wordt opgemerkt dat het gebruikte schadecriterium van maximale scheurbreedte geen rekening houdt met het aantal scheuren. Als een gebouw scheurtjes heeft in een berekening voorafgaand aan de beving en in de bevingssimulatie er wel meer scheuren ontstaan maar de maximale scheurbreedte gelijk blijft dan kan op basis van de maximale scheurbreedte niet vastgesteld worden of de schade is verergerd. In het lopende TNO onderzoek zijn al enkele stappen gezet om dit op te lossen. In (TNO, 2023) is een literatuurstudie uitgevoerd naar schademaaten die ook het aantal scheuren in rekening brengen. Hierin wordt verwezen naar de schademaat  $\Psi$  beschreven in (TuDelft, 2019). Deze schademaat brengt lengte van scheuren, aantal scheuren en maximale scheurbreedte samen in één getal dat schade beschrijft. Deze schademaat lijkt geschikt voor de toepassing van geïnduceerde seismiciteit.

TNO heeft inmiddels een eigen metselwerk materiaalmodel ontwikkeld (TNO, 2024). Dit model is gebaseerd op de specificaties en literatuur van het Engineering Masonry Model en is gevalideerd met benchmarks op elementniveau en op componentniveau (een muur onder buiging en in het vlak). Dit gevalideerde materiaalmodel kan geïmplementeerd worden in de eindige elementen software die het meest geschikt is voor de gewenste toepassing. Bijvoorbeeld in pakketten met impliciete solvers voor studie van schade door bodemdaling, of pakketten met expliciete solvers voor dynamische modellen met veel vrijheidsgraden, in het bijzonder die met een fijnmazig grondblok. Hiermee wordt verwacht dat een volledig grondblok gemodelleerd kan worden om de grond-constructie interactie goed te modelleren. Dit is essentieel om andere trillingsbronnen door te kunnen rekenen (punt 1 hierboven). Ook kan het materiaalmodel verder ontwikkeld worden.

## 5 Overige onderwerpen

In dit hoofdstuk worden twee onderwerpen uitgelicht die niet in detail aan bod zijn gekomen in dit rapport, maar relevant zijn om te komen tot betrouwbare uitspraken over schade bij geïnduceerde seismiciteit en de toepassing van de kwetsbaarheidskrommen.

### 5.1 Mogelijkheid om schade te beoordelen zonder integratie van de kwetsbaarheidskrommen

Zoals in hoofdstuk 1 besproken, zijn er in geval van geïnduceerde seismiciteit geen metingen beschikbaar en kan een SBR Richtlijn A methode die gebaseerd is op gemeten trillingsniveaus niet direct gebruikt worden. Om de schadekans te bepalen is een probabilistische aanpak vereist waarbij kwetsbaarheidskrommen gecombineerd worden met de prognose van bodembewegingsmodellen (inclusief onzekerheid) op de locaties van gebouwen.

In (TNO, 2023) is een conservatieve alternatieve methode beschreven waarbij direct op de 1% schadekans getoetst kan worden zonder gebruik van een kwetsbaarheidskromme. Deze methode kan toegepast worden als 3 condities gelden:

1. Het model voor voorspelling van de  $V_{top}$  waarde aan de fundering (het bodembewegingsmodel) heeft een onzekerheid die beschreven wordt met een lognormale verdeling
2. De kwetsbaarheidskromme van het gebouw is lognormaal verdeeld
3. De onzekerheid in de kwetsbaarheidskromme is groter dan die in het bodembewegingsmodel

Als deze condities gelden dan kan de  $V_{top}$  waarde uit het bodembewegingsmodel bij een overschrijdingskans van 0.176 vergeleken worden met de grenswaarden uit de SBR Richtlijn A. Ligt deze onder de grenswaarde dan is de kans op schade kleiner dan 1%. Met grenswaarden wordt hier bedoeld de SBR grenswaarden na toepassing van partiële factoren, zie (TNO, 2023) voor details.

Het is mogelijk eenvoudiger aan te tonen dat een kwetsbaarheidskromme voor geïnduceerde seismiciteit meer onzekerheid heeft dan het bodembewegingsmodel via een paar steekproeven dan om kwetsbaarheidskrommen af te leiden voor een variëteit aan gebouwen en bouwkundige staat.

In het TNO onderzoek wordt, naast het ontwikkelen van feitelijke kwetsbaarheidskrommen, deze optie ook bestudeerd.

## 5.2 Vergelijking van geïnduceerde seismiciteit met andere trillingsbronnen

In het TNO onderzoek wordt veel belang gehecht aan het vergelijken van schade door geïnduceerde seismiciteit met schade door andere trillingsbronnen die expliciet genoemd worden in de SBR Richtlijn A. Hiervoor zijn globaal twee redenen aan te geven:

1. In de ontwikkeling van de SBR Richtlijn A (SBR-A, 2017) is de toepassing van de SBR Richtlijn A voor geïnduceerde seismiciteit in verband met de gaswinning in Groningen een veel besproken onderwerp geweest. In recente jaren met de ontwikkelingen van de geothermie is ook vaak de vraag vaak gesteld of de SBR Richtlijn A gebruikt mag worden zonder wijziging. Dit betreft de keuzes voor de grenswaarden, de bepaling van dominante frequenties en de toe te passen partiële factoren.
2. Het afleiden van Kwetsbaarheidskrommen voor geïnduceerde seismiciteit voor verschillende typen gebouwen is een erg grote onderzoeksvraag omdat er een aanzienlijk aantal typen gebouwen zijn die in een verschillende staat van bouw verkeren. In de SBR Richtlijn A zijn grenswaarden gegeven voor twee categorieën gebouwen met een extra partiële factor voor monumenten of in slechte staat verkerende gebouwen. Dit is een relatief eenvoudige onderverdeling die in de praktijk eenvoudig uitgewerkt kan worden. Het is eenvoudiger om voor een aantal gebouwen als steekproef kwetsbaarheidskrommen af te leiden voor geïnduceerde seismiciteit en deze te vergelijken met die van een andere trillingsbron waarvoor de SBR Richtlijn A geldig is. Als voor die steekproeven blijkt dat de SBR Richtlijn A van toepassing is, of hieruit een partiële factor volgt voor geïnduceerde seismiciteit die onder de steekproeven niet veel verschilt is het goed verdedigbaar de SBR Richtlijn A ook voor de andere typen gebouwen te gebruiken met die factor.

Punt 2 neemt ook een aantal onzekerheden weg in de modellering zoals in hoofdstuk 4 beschreven is bij [Figuur 4.5](#) voor de maat voor schade bij het bereiken van de grenswaarde. Zonder een trillingsbron te modelleren waarvoor de SBR Richtlijn A van toepassing is, is die schademaat bij het bereiken van de grenswaarde niet makkelijk te bepalen.

## 6 Conclusies en Aanbevelingen

In dit rapport is een overzicht gegeven van TNO onderzoek naar schade door geïnduceerde seismiciteit. De beperkingen van de huidige SBR Richtlijn A voor deze toepassing zijn beschreven samen met het onderzoek om deze beperkingen aan te pakken.

In grote lijnen kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- De SBR Richtlijn A is niet expliciet voor geïnduceerde seismiciteit geschreven, maar sluit deze toepassing ook niet uit. De grenswaarden in de huidige SBR Richtlijn A zijn echter alleen bepaald op basis van numerieke analyses en praktijkdata voor trillingsbronnen anders dan geïnduceerde seismiciteit.
- Empirische kwetsbaarheidskrommen beschikbaar uit eerdere studies zijn niet direct te vergelijken met de grenswaarden in de SBR Richtlijn A omdat de partiële factor voor een indicatieve meting in de richtlijn niet is beschouwd en de toen gebruikte bodembeweging, de PGV (geometric mean), niet goed aansluit bij de  $V_{top}$  in de richtlijn.
- Kwetsbaarheidskrommen bepaald met lineaire 3D eindige elementen modellen en een trekspanningscriterium voor initiatie van scheuren (onzichtbare haarscheurtjes) voor heien, treinverkeer en geïnduceerde seismiciteit liggen zeer dicht bij elkaar na toepassen van partiële factoren voor het type trillingsbron en dominante frequentie uit de SBR Richtlijn A.
- Kwetsbaarheidskrommen bepaald met 3D eindige elementen modellen met niet-lineair metselwerkgedrag die groei van scheuren kan beschrijven komen voor geïnduceerde seismiciteit overeen met de SBR Richtlijn A als voor de schademaat een scheurbreedte van 1,15 mm wordt aangehouden, dit ligt net buiten de Burland *degree of damage* D1 en onderin D2.

Het gepresenteerde onderzoek geeft de indicatie dat de SBR Richtlijn A op geïnduceerde seismiciteit toegepast kan worden. Of dit zonder modificatie mogelijk is, kan nog niet hard geconcludeerd worden. Daarnaast is de SBR Richtlijn A ontwikkeld voor situaties waar trillingen aan gebouwen zijn gemeten. Bij geïnduceerde seismiciteit zijn er voor de meeste gebouwen geen meetgegevens. Daarom moet worden gewerkt met voorspelde trillingsniveaus via een bodembewegingsmodel en is een probabilistische aanpak nodig om de schadekans te bepalen en hiervoor geeft de SBR Richtlijn A niet voldoende handvatten. Het wordt daarom aanbevolen om:

- Empirische kwetsbaarheidskrommen af te leiden op basis van de schademeldingen na aardbevingen in Groningen en Roswinkel in combinatie met een bodembewegingsmodel die de  $V_{top}$  (het maximum van de horizontale en verticale pieksnelheden) beschrijft en waarbij rekening gehouden is met de partiële factor in de SBR Richtlijn A indicatieve metingen. Zo is een direct vergelijk tussen de kwetsbaarheidskrommen en SBR grenswaarden mogelijk.

- Het TNO metselwerkmodel te gebruiken in een eindige elementenpakket met expliciete solver dat een groot bodemmodel toelaat en hiermee voor geïnduceerde seismiciteit en ten minste één andere trillingsbron, bijvoorbeeld heien, kwetsbaarheidskrommen af te leiden. Dan kan de keuze voor het schadecriterium uit het model voor heien afgeleid worden en worden getoetst of de kwetsbaarheidskromme voor seismiciteit past bij de SBR Richtlijn A grenswaarden.
- In de berekeningen het gebouw realistischer te modelleren en variaties in geometrie naast sterkte-eigenschappen stochastisch in rekening te brengen.
- Indien mogelijk in de berekeningen de kwetsbaarheidskrommen te bepalen voor de toename van schade, door gebruik te maken van een geschikte schademaat. Als een gebouw al enige schade heeft sluit dit beter aan met de waardevermindering van een gebouw conform de SBR Richtlijn A.

Daarnaast wordt als lange termijn visie aanbevolen om het TNO metselwerk model door te ontwikkelen en valideren met praktijkdata voor lichte schade om tot één model te komen dat geschikt is voor zowel trillingsschade als schade door langere termijn bodembeweging.

## 7 Referenties

Arup (2013) Groningen 2013 Seismic Risk Study - Earthquake Scenario-Based Risk Assessment, Arup report REP/229746/SR001, 29 November 2013

Bommer et al (2017) Empirical Ground-Motion Prediction Equations for Peak Ground Velocity from Small-Magnitude Earthquakes in the Groningen Field Using Multiple Definitions of the Horizontal Component of Motion - Updated Model for Application to Smaller Earthquakes. Bommer, J. J., Stafford, P. J., & Ntinalexis, M. (2017)

Bommer et al (2021) Empirical Equations for the Prediction of Peak Ground Velocity due to Induced Earthquakes in the Groningen Gas Field, October 2021, J. J Bommer, P. J Stafford, M. Ntinalexis

Burland et al (1977) Behaviour of Foundations and Structures, Burland J. B., Broms B. B. and Mello V. F. B. , 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. - Tokyo : Paper presented at the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1977.

Crowley et al (2019) Probabilistic damage assessment of buildings due to induced seismicity, Crowley H., Pinho R., van Elk J., Uilenreef J., Bulletin of Earthquake Engineering (2019) 17:4495–4516

CUR 57 (1972) CUR-rapport 57: Dynamische problemen in de bouw, Zoetermeer: Betonvereniging 1972

DIANA (2017) DIANA FEA BV, Diana User's Manual, Release 10.1, 2017

DIN 5140-3 (1986) Structural vibration in buildings, Effects on structures, DIN 4150-3, 1986

EMS (1998) European Macroseismic Scale 1998, Editor G. GRÜNTAL, Luxembourg 1998

SBR-A (2002) SBR. Trillingen: meet- en beoordelingsrichtlijnen Schade aan gebouwen. Deel A., eerste herziening, SBR, 2002

SBR-A (2017) SBR. Trillingen: meet- en beoordelingsrichtlijnen Schade aan gebouwen. Deel A., tweede herziening, SBRCURnet, 2017

Hooglerarenpanel (2021a) Risicobeleid seismiteit overige mijnbouw, Advies hooglerarenpanel Algemene uitgangspunten voor de omgang met de seismische risico's van overige mijnbouw, 31 augustus 2021, 31082021

Hooglerarenpanel (2021b) Advies hooglerarenpanel Risicobeleid seismiteit overige mijnbouw, Advies geothermie, 31 augustus 2021, 31082021

KNMI (2007) Pers. Communicatie, B. Dost, KNMI

KNMI (2020) E. Ruigrok and B. Dost, Advice on the computation of peak ground-velocity confidence regions for events in gas fields other than the Groningen gas field, De Bilt, 2020 | Technical report; TR-386, Royal Netherlands Meteorological Institute, Ministry of Infrastructure and Water Management

Ntinalexis et al (2019) Ground-motion networks in the Groningen field: usability and consistency of surface recordings, M. Ntinalexis, J. J. Bommer, E. Ruigrok, B. Edwards, R. Pinho, B. Dost, A. A. Correia, J. Uilenreef, P. J. Stafford, J. van Elk, J Seismol (2019) 23:1233–1253

Ntinalexis et al (2022) A database of ground motion recordings, site profiles, and amplification factors from the Groningen gas field in the Netherlands, M. Ntinalexis, P. P. Kruiver, J. J. Bommer, E. Ruigrok, A. Rodriguez-Marek, B. Edwards, R. Pinho, J. Spetzler, E. Obando Hernandez, M. Pefkos, M. Bahrapouri, E. P van Onselen, B. Dost, J. van Elk., Earthquake Spectra, 2022

TNO (1967) H. van Koten, "Grenzen voor dynamische bewegingen", TNO rapport IBBC BI-76-107 (1967)

TNO (1993) Modelleren van Constructies bij een Dynamische Excitatie via de fundering, B.H.J. Raaijmakers, afstudeerrapport TNO, 93-CON-R1383, 1993

TNO (1993) Trillingscriteria m.b.t. schade aan gebouwen, P.C. van Staalduinen, M.Th.J.H. Smits, TNO rapport B-90-822, 1991, revisie 1993

TNO (1997) kans op schade aan bouwwerken door trillingen, P.H. Waarts, TNO rapport 97-CON-R1698, 1997

TNO (1999) Literatuurstudie in verband met de revisie van SBR Richtlijnen 1-3, P.C. van Staalduinen, P.H. Waarts, TNO rapport 1999-CON,DYN-R0092, 1999

TNO (2000) Enquête naar het gebruik van de SBR-Richtlijnen, P.H. Waarts, 2000-CON-DYN-R2045

TNO (2009) Kalibratiestudie schade door aardbevingen, W. Roos, P.H. Waarts, B.B.T. Wassing, TNO rapport TNO-034-DTM-2009-04435, 2009

TNO (2013) Analyse van de gevolgen van de aardbeving te Huizinge d.d. 16 augustus 2012, H. Borsje, J.N. Huibregtse, TNO rapport 2012R10227, 2013

(TNO, 2016) Relatie tussen PGA waarden en kans op schade voor geïnduceerde aardbevingen in Groningen, C.P.W. Geurts, R.D.J.M. Steenbergen, TNO Memo M0100296951, 2016

TNO (2016a) Herziening SBR Richtlijn A: Literatuurstudie, L. Hellebrandt, C.P.W. Geurts, TNO rapport TNO 2016 R10863, 2016

TNO (2016b) Re-analysis of S-curves for damage to buildings due to vibrations, L. Hellebrandt, C.P.W. Geurts, TNO 2016 R10864

TNO (2016c) Kans op Schade bij Trillingen - Evaluatie Database Praktijkdata, C.P.W. Geurts, TNO rapport TNO 2016 R11734

TNO (2017) Fragility functions for damage in masonry structures caused by vibrations, D.L. Allaix, C.P.W. Geurts, TNO rapport R11272, 2017

TNO (2018) Observation based, slight damage fragility curves for dwellings subjected to induced seismic actions in the Groningen region Derivation of fragility curves and analysis of assumptions and uncertainties, Chris Geurts, Arpad Rozsas, TNO report 2018 R11586

TNO (2018b) Fragility curve for a Typical Dutch Terraced House using Non Linear Time History Analysis, J. Kraus, D.L. Allaix, TNO internal report, 2018

TNO (2019) Fragility – Validation EUC-BUILD6 for the purpose of building-to-building variability study, J. Kraus, TNO internal report, 2019

TNO (2020) A comparative computational study of vibration induced damage in masonry buildings by earthquakes and pile driving, J. Pennings, D. Moretti, A.J. Bronkhorst, J. Puijsma, TNO report R12204, 2020

TNO (2021) Train-induced vibrations, D. Moretti, J. Pennings, TNO internal draft report, R0000, 2021

TNO (2022) Quantification of earthquake induced damage by non-linear finite element analyses of a general building model, J. Pennings, TNO internal memo

TNO (2023) Vibration Intensity Measures for Damage to Buildings, J. Puijsma, D. Moretti, C.P.W. Geurts, TNO rapport 2023 R10296

TNO (2023b) Quantification of light damage on masonry buildings due to induced seismicity, Karapanou A., Moretti D., Puijsma J., Altinga N., TNO rapport 2023 R10324

TNO (2023c) Literature review of damage measures in assessment of masonry buildings, TNO rapport TNO R12433, 2023

TNO/EBN (2023) Seismische Dreigings- en Risicoanalyse voor aardwarmteprojecten in Nederland, H. Mijnlief, S. de Vries, B. Jaarsma, B. Vogelaar, Rapport versie 16 november 2023

TNO (2024) Replication of Engineering Masonry model as a user-supplied subroutine in DIANA, M. Pari, TNO draft report R00000, 2024

SODM (2021) Validatie van het seismisch netwerk van het KNMI in Groningen, Staatstoezicht op de mijnen, 2021

TuDelft (2019) Crack initiation and propagation in unreinforced masonry specimens subjected to repeated in-plane loading during light damage, P. Korswagen, M. Longo, M. Meulman, J. Rots, Bulletin of Earthquake Engineering (2019)

TuDelft (2021) Computational modelling checks of masonry building damage due to deep subsidence, J.G. Rots, P. Korswagen, M. Longo, Delft University of Technology, 2021

TuDelft (2022) Fragility curves for light damage of clay masonry walls subjected to seismic vibrations, P. A. Korswagen, M. Longo, J. G. Rots, Bulletin of Earthquake Engineering, 2022

TuDelft (2024) Research into the combined effects of soil strains, soil curvatures and earthquake vibrations from multiple mining activities on damage in masonry, P. Korswagen, M. Longo, J. Rots, Delft University of Technology, 2024

## 8 Ondertekening

Delft, 26 november 2025

Ir. J.P. Pruiksma  
Auteur

C. Coppitz  
Project manager

Ir. M. van Roermund  
Research manager  
Reliable Structures

## Bijlage A Schadetoestanden

In dit rapport wordt gerefereerd aan twee definities van schadetoestanden voor metselwerk gebouwen, namelijk de *degree of damage* van (Burland et al, 1977) hier opgenomen als [Tabel 8.1](#) en de *damage grades* van de European Macroseismic Scale (EMS, 1998), hier weergegeven in [Figuur 8.1](#). In dit rapport wordt de Burland *degree of damage* aangeduid met D0, D1, etc. en de EMS *damage grades* worden aangeduid met *EMS Grade 1*, *EMS Grade 2*, etc.

In (TNO, 2016) en (Hooglerarenpanel, 2021) wordt gesproken over Damage States aangeduid met DS1, DS2, etc. Deze term is waarschijnlijk afkomstig uit het rapport (Arup, 2013) waar FEMA-HAZUS Damage States gebruikt worden in berekeningen aangeduid met DS1, DS2, etc. In dat rapport wordt ook een vergelijking gemaakt met de (EMS, 1998) Damage grades en deze worden verondersteld identiek te zijn. In (Crowley et al, 2019) worden de (EMS, 1998) Damage grades ook aangeduid met DS1, DS2, etc.

Om verwarring te voorkomen worden Damage States DS1, DS2, etc., uit de hier bovengenoemde referenties, in dit rapport aangeduid met de EMS Grade 1, EMS Grade 2, etc.

**Tabel 8.1:** Schadetoestanden, de *Degree of Damage*, volgens (Burland et al, 1977)

| Degree of damage |             | Description                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Crack width |
|------------------|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| 0                | Negligible  | Hairline cracks                                                                                                                                                                                                                                                                                          | <0.1 mm     |
| 1                | Very Slight | Fine cracks which can easily be treated during normal decoration. Perhaps isolated small fracture in building. Cracks in external brickwork visible on close inspection                                                                                                                                  | < 1 mm      |
| 2                | Slight      | Cracks easily filled. Re-decoration probably required. Several slight fractures showing inside of building. Cracks are visible externally and some re-pointing may be required externally to ensure weathertightness. Doors and windows may stick slightly.                                              | < 5 mm      |
| 3                | Moderate    | The cracks require some opening up and can be patched by a mason. Recurrent cracks can be masked by suitable linings. Repointing of external brickwork and possibly a small amount of brickwork to be replaced. Doors and windows sticking. Service pipes may fracture. Weathertightness often impaired. | 5 – 15 mm   |
| 4                | Severe      | Extensive repair work involving breaking-out and replacing sections of walls, especially over doors and windows. Windows and door frames distorted, floor sloping noticeably. Walls leaning or bulging noticeably, some loss of bearing in beams. Service pipes disrupted.                               | 15 – 25 mm  |
| 5                | Very Severe | This requires a major repair job involving partial or complete re-building. Beams lose bearing, walls lean badly and require shoring. Windows broken with distortion. Danger of instability                                                                                                              | >25 mm      |

| Classification of damage to masonry buildings                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    | <b>Grade 1: Negligible to slight damage</b><br>(no structural damage, slight non-structural damage)<br>Hair-line cracks in very few walls.<br>Fall of small pieces of plaster only.<br>Fall of loose stones from upper parts of buildings in very few cases.                             |
|    | <b>Grade 2: Moderate damage</b><br>(slight structural damage, moderate non-structural damage)<br>Cracks in many walls.<br>Fall of fairly large pieces of plaster.<br>Partial collapse of chimneys.                                                                                       |
|   | <b>Grade 3: Substantial to heavy damage</b><br>(moderate structural damage, heavy non-structural damage)<br>Large and extensive cracks in most walls.<br>Roof tiles detach. Chimneys fracture at the roof line; failure of individual non-structural elements (partitions, gable walls). |
|  | <b>Grade 4: Very heavy damage</b><br>(heavy structural damage, very heavy non-structural damage)<br>Serious failure of walls; partial structural failure of roofs and floors.                                                                                                            |
|  | <b>Grade 5: Destruction</b><br>(very heavy structural damage)<br>Total or near total collapse.                                                                                                                                                                                           |

Figuur 8.1: Schadetoestanden, de *Damage Grades*, uit (EMS, 1998).

Mobility & Built Environment

[www.tno.nl](http://www.tno.nl)