

ESTHETISCHE, FUNCTIONELE EN CONSTRUCTIEVE SCHADE
BIJ METSELWERK EN BETONNEN CONSTRUCTIES

PROCESVOORSCHRIFT SCHADEOPNAME SPOORTRILLINGEN



NOTITIE



Opsteller	Pieter Boon
Telefoon	+31 6 1003 9454
E-mail	pieter@we-boost.nl
Bedrijf	We-Boost
Controle	Tom van Swinderen
Datum	27 oktober 2023
Onderwerp	Esthetische, functionele en constructieve schade bij metselwerk en betonnen constructies
Projectcode	WBD2022-041

SAMENVATTING

Bij het beoordelen van schades door trillingen wordt regelmatig de vraag gesteld of een situatie nog veilig is. Om dat te beoordelen is het zinvol om schades te classificeren, met onderscheid tussen esthetische, functionele en constructieve schade. In deze notitie stellen we een schade classificatie voor aan de hand van literatuur en praktijkgegevens. Hieronder is een samenvattend overzicht opgenomen met per schadeklasse een omschrijving, hersteladvies, gevolgen (bijvoorbeeld afname economische waarde gebouw (**rood** betekent dat dit naar verwachting optreedt, **oranje** dat dit mogelijk of beperkt optreedt, **groen** dat dit niet optreedt), isolatiewaarde of gebruikswaarde gebouw, of risico op onveilige situaties) en vanaf welke trillingsniveaus een dergelijke schade ongeveer kan optreden, gerelateerd aan de in Nederland gebruikte SBR A:2017.

Klasse	Scheurwijdte	Omschrijving	Hersteladvies	Afname economische waarde	Afname isolatiewaarde	Afname gebruikswaarde	Gebouw onveilig	Mogelijk vanaf
Esthetische schade	0.1 - 5 mm	Kleine scheuren in pleister- en voegwerk, volgt doorgaans de voeg. Licht klemmende ramen en deuren	Herstel is eenvoudig, met voegmortel of sierpleister. Kan zonder onderhoud verergeren door veroudering en weersinvloeden.	●	●	●	●	ca. 1 x grenswaarde
Functionele schade	ca. 3 - 25 mm of groot aantal kleine scheuren	Middelgrote scheuren in pleister-, voeg- en metselwerk. Ramen en deuren klemmen, muren staan scheef, tocht of vochtdoorslag	Herstellen met voegmortel, sierpleister of vervangen van bakstenen. Kan zonder onderhoud verergeren door veroudering en weersinvloeden.	●	●	●	●	ca. 4 x grenswaarde
Constructieve schade	> ca. 15 mm of groot aantal kleine scheuren	Grote scheuren, constructie moet worden ondersteund, veiligheid in het geding (vallende onderdelen, (gedeeltelijk) instortingsgevaar)	Direct herstel noodzakelijk, door vervangen van (delen van) het gebouw	●	●	●	●	ca. 10 x grenswaarde



INHOUDSOPGAVE

1.	Schadetypes.....	3
1.1.	Scope van deze notitie.....	3
1.2.	Schade in de SBR A:2017	3
1.3.	Schadeclassificaties in de literatuur.....	3
1.4.	Te gebruiken definities en classificatie.....	7
2.	Trillingen en schadeklassen.....	9
2.1.	Buitenlandse literatuur	9
2.2.	Nederlandse literatuur.....	10
2.3.	Grenswaarden voor schadeklassen	13
2.4.	Leemten in kennis	14
	Literatuur.....	16



AANLEIDING VAN DEZE NOTITIE

Bij het beoordelen van schade is het zinvol om onderscheid te maken tussen schades naar de ernst van de schade. Immers, sommige schades hebben vooral een esthetisch gevolg (een scheur kan afbreuk doen aan de uitstraling en waarde van een gebouw), maar grotere scheuren kunnen leiden tot gevaarlijke situaties (in het ergste geval instorten van (delen van) het gebouw, waardoor de veiligheid in het geding is).

In de SBR A:2017, die wordt gebruikt om de kans op schade door trillingen te beoordelen, wordt geen onderscheid gemaakt in de ernst van de schade. Als er in een schaderapport volgens de richtlijn sprake is van een kans op schade, dan wordt dit door gebouweigenaren verschillend geïnterpreteerd: variërend van 'er is niet veel aan de hand' tot 'dit is een levensbedreigende situatie'. Terwijl schade door treintrillingen meestal in de categorie esthetische schade valt, met alleen gevolgen voor de uitstraling van het gebouw.



DOEL VAN DEZE NOTITIE

Doel van deze notitie is om, op basis van de laatste inzichten in de wetenschap en vanuit praktijkvoorbeelden, duidelijkheid te geven over de verschillende types schade en de mogelijkheid van optreden daarvan in relatie tot de grenswaarden uit de SBR A:2017. Deze notitie is zowel bedoeld voor bewoners (als voorlichting) als voor onderzoekers (als naslagnotitie bij het beoordelen van schades).



LEESWIJZER

In hoofdstuk 1 gaan we in op definities van verschillende schadetypes in de literatuur, en komen we tot een indeling die in Nederland bruikbaar is. In hoofdstuk 2 gaan we in op de relatie tussen trillingsniveaus (conform de SBR A:2017) en die schadetypes.



SCHADETYPES

In dit hoofdstuk beschrijven we de verschillende classificaties die in de literatuur worden gegeven van schades, en doen we een voorstel voor schadeclassificatie bij treintrillingen.

1.1. SCOPE VAN DEZE NOTITIE

In deze notitie wordt gefocust op metselwerk- en betonnen constructies. Constructiematerialen zoals glas, hout en staal, krijgen in de literatuur maar beperkt aandacht omdat deze in de praktijk minder kwetsbaar zijn dan metselwerk- en betonnen constructies. Ook in de SBR A:2017 vallen houten en stalen constructies buiten de scope, glas heeft vrijwel nooit een dragende functie en wordt ook in de SBR A:2017 niet besproken.

Gelet op de hoogte van de trillingen van treinverkeer, is schade aan houten en stalen constructies of delen daarvan onwaarschijnlijk, daarom worden deze materialen in deze notitie niet verder beschouwd. Ook esthetische schade (in de vorm van haarscheurtjes) in houten of stalen materialen als gevolg van de trillingen van treinverkeer is onwaarschijnlijk. Schade aan beglazing door trillingen (bijv. lekkage of glasbreuk) komt in de praktijk niet of nauwelijks voor. Er zijn in de literatuur dan ook geen duidelijke grenswaarden voor trillingen beschikbaar voor beglazing. Ook beglazing worden daarom in deze notitie niet nader beschouwd. Deze notitie heeft daarom uitsluitend betrekking op metselwerk- en betonnen constructies.

1.2. SCHADE IN DE SBR A:2017

De grenswaarden in de SBR A:2017 zijn zodanig opgesteld dat deze bescherming bieden tegen zowel het ontstaan als het uitbreiden of verergeren van schade, en zowel tegen lichte schade als zware schade. In de SBR A:2017 wordt rekening gehouden met verergering van bestaande schades door gebouwen met al aanwezige schade te classificeren als 'trillingsgevoelig', en daarvoor strengere grenswaarden te hanteren.

De grenswaarde uit de SBR A:2017 staat voor 1 procent kans op schade. Bij trillingen boven de grenswaarde neemt de kans op schade toe. Met die 1 procent kans op schade bij de grenswaarde sluit de SBR A:2017 schade onder de grenswaarde niet uit, maar de kans erop is klein en beperkt tot uitzonderlijke gevallen. De (kleine) kans van 1 procent op het ontstaan van schade onder de grenswaarde komt voor rekening van de eigenaar (of de verzekeraar) van het gebouw, omdat onder die kans aansprakelijkheid van de uitvoerder van een activiteit niet of nauwelijks valt te bewijzen en omdat andere oorzaken voor het ontstaan van schade dan waarschijnlijker zijn (tenzij die oorzaken niet aanwezig zijn of hun invloed niet kan worden aangetoond).

Relevant is tenslotte dat de SBR A:2017 is opgesteld voor het beoordelen van trillingsschade door uiteenlopende oorzaken: bouwwerkzaamheden, verkeer maar ook explosies. De praktijk van de afgelopen tientallen jaren laat zien dat de trillingen die door bijvoorbeeld bouwwerkzaamheden of aardbevingen ontstaan, doorgaans (veel) hoger zijn dan de trillingen door treinverkeer. Ook de gevolgen (schades) kunnen dan veel groter zijn, waardoor het zeker voor bouwwerkzaamheden en aardbevingen zinvol is om onderscheid te maken tussen schadeklassen.

1.3. SCHADECLASSIFICATIES IN DE LITERATUUR

In deze paragraaf gaan we eerst kort in op veelgebruikte schadeclassificaties (definities). Daarna gaan we in meer detail in op de twee meest gebruikte schadeclassificaties in de literatuur: die van

Burland (1995)¹ en de CEGS-classificatie (1998)². Burland (1995) kijkt vooral naar schadeherstel, en classificeert op basis van hoe kostbaar of omvangrijk een reparatie van een schade is, EMS (1998) kijkt vooral naar de veiligheid.

1.3.1. DEFINITIES IN DE LITERATUUR

In de literatuur wordt schade op verschillende manieren geclassificeerd. Daarbij wordt meestal onderscheid gemaakt tussen drie schadetypes:

- **Esthetische schade** (soms ook wel cosmetische schade genoemd). Dit gaat om lichte schades, die geen gevolgen hebben voor het functioneren en de veiligheid van het gebouw en eenvoudig repareerbaar zijn.
- **Functionele schade** (soms ook wel architecturale of bouwkundige schade genoemd). Bij dit type schade is er sprake van het verlies van de primaire functie van het metselwerk: er kan sprake zijn van vochtdoorslag, verlies van isolatiewaarde of tocht. Repareren vraagt uitgebreidere maatregelen dan bij esthetische schade.
- **Constructieve schade**. Dit zijn grote(re) schades waarbij de constructieve samenhang van het gebouw niet meer is gegarandeerd, bij verergering van de schades kan de veiligheid in het geding komen. Repareren vraagt vaak vervanging van (delen van) de constructie.

Bovengenoemde classificaties zijn het meest gebruikt, maar er zijn ook alternatieve classificaties:

- De British Standard 5228-2 (2014) hanteert een andere classificatie, en maakt onderscheid tussen (1) cosmetische schade (haarscheurtjes, de groei van bestaande scheuren in pleisterwerk of het ontstaan van haarscheurtjes in voegen van metselwerk), (2) geringe schade (ontstaan van lange scheuren, losrakend pleisterwerk en scheuren door metselwerk of betonnen blokken) en (3) aanzienlijke schade (schade aan constructieve elementen van het gebouw, scheuren in ondersteuningskolommen en het losraken van verbindingen).
- TNO (1991)³ maakt onderscheid tussen constructieve en niet-constructieve schade. Constructieve schade zorgt voor een vermindering van de integriteit van een (onderdeel van een) gebouw, waardoor de constructieve veiligheid in het geding kan komen, of voor schade aan onderdelen van een gebouw waardoor de veiligheid van personen in gevaar kan komen (denk aan een vallende schoorsteen). Niet-constructieve schade zorgt alleen voor een lagere gebruikswaarde of verlies van functie, zonder gevaar voor de veiligheid. Ook de SBR A:2017 hanteert dit onderscheid, en maakt de gevolgen expliciet. Bij constructieve schade is sprake van één of meer van de volgende gevolgen:
 - a. Verlies van functie, zoals het bezwijken van dragende onderdelen waardoor de constructieve veiligheid in het geding kan komen.
 - b. Vermindering van de integriteit van een gebouw(onderdeel) met betrekking tot de dragende functie, waardoor de veiligheid vermindert of de levensduur afneemt.
 - c. Bezwijken van gebouwonderdelen die geen dragende functie hebben (zoals plafonds, ornamenten en niet-dragende scheidingsmuren), maar waarvan het bezwijken de veiligheid van personen in of bij het bouwwerk in gevaar kan brengen.
 Bij niet-constructieve schade is sprake van:
 - d. Vermindering van de economische of gebruikswaarde, zoals scheurvorming in metselwerk, bekleding van constructiedelen, afwerklagen of betegeling zonder dat daarbij de veiligheid in het geding komt.

¹ Assessment of damage in low-rise buildings, BRE Digest 251

² G. Grünthal (red.), European Macroseismic Scale 1998, Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Walferdange (LU), 1998

³ Trillingscriteria m.b.t. schade aan gebouwen, TNO, maart 1991

Niet-constructieve schade kan worden gesplitst in esthetische en functionele schade, waarmee deze schade-indeling aansluit op de hierboven genoemde classificatie.

- De Vent (2011)⁴ focust in haar onderzoek op constructieve schade, en onderscheidt die van esthetische en functionele schade op twee manieren: (1) constructieve schade laat een gebrek aan sterkte, stijfheid of stabiliteit van een constructie zien door scheurontwikkeling, vervorming of rotatie van een gebouw(onderdeel) en (2) constructieve schade bedreigt de fysieke veiligheid van mensen. Bij De Vent lijkt constructieve schade echt gerelateerd aan schade in de constructie, niet in andere onderdelen van een gebouw.

Een laatste opmerking: uit literatuur en enquêtes (zie bijv. RIVM (2023)⁵) blijkt dat het gevoel van onveiligheid (angst voor schade) zich ook al bij esthetische schade voordoet, en dat dit dus los staat van de in de literatuur gebruikte definities voor constructieve veiligheid.

1.3.2. CLASSIFICATIE BURLAND (1995) - SCHADEHERSTEL

Eén van de meest aangehaalde onderzoeken naar classificatie op repareerbaarheid is een onderzoek van Burland (1995)⁶. Hij hanteert zes schadeklassen (0 tot en met 5) op basis van repareerbaarheid, zie Tabel 1 (mede gebaseerd op onderzoek van TNO (2021)⁷.

Tabel 1 Schade classificaties conform Burland (1995) en TNO (2021)

Schadetype	Schadeklasse	Scheurgrootte	Omschrijving schadebeeld	Benodigde herstelactie
Esthetisch	0	< 0.1 mm	Haarscheurtjes	Geen actie nodig
	1	0.1 - 1 mm	Zeer lichte scheurvorming. Scheuren in pleisterwerk, nauwelijks zichtbaar in metselwerk.	Indien gewenst aan binnenzijde wegwerken met behang, verf of sierpleister.
	2	1 - 5 mm	Lichte scheurvorming. Scheuren kunnen aan buitenzijde zichtbaar zijn en vochtdoorslag geven. Deuren en ramen klemmen licht.	Herstellen met sierpleister of voegmortel, terugkerende scheuren eventueel met wapeningsband. Ramen en deuren bijstellen.
Functioneel	3	5 - 15 mm of meerdere scheuren > 3 mm	Matige scheurvorming. Vochtdoorslag en schade aan nutsaansluitingen mogelijk. Klemmende ramen en deuren.	Scheuren in metselwerk herstellen met voegmortel of door stenen te vervangen. Constructie waterdicht maken en ramen en deuren bijstellen.
	4	15 - 25 mm, kleiner bij meer scheuren	Ernstige scheurvorming. Bruikbaarheid en toegankelijkheid van gebouw ernstig beperkt, gebouw en muren staan scheef.	Herstellen door vervangen van (delen van) muren of andere onderdelen van het gebouw, vooral boven muren en ramen.
Constructief	5	> 25 mm, kleiner bij meer scheuren	Zeernstige scheurvorming. Instortingsgevaar, constructie moet worden ondersteund.	Volledige renovatie, of sloop en herbouw noodzakelijk.

Over de door TNO toegevoegde classificatie van schadetypes (eerste kolom in Tabel 1) is discussie

⁴ Ilse de Vent, Structural damage in masonry, Developing diagnostic decision support, TU Delft, 2011

⁵ E. van Kempen et al., *Hinder en slaapverstoring door trillingen van treinen, Resultaten van de Vervolgmeting "Wonen langs het spoor"*, RIVM, 2023

⁶ Assessment of damage in low-rise buildings, BRE Digest 251

⁷ Schade aan gebouwen door spoorwegtrillingen, TNO, 19 juli 2021

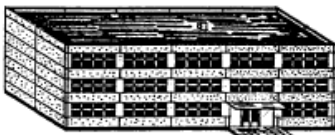
mogelijk. De grenzen tussen esthetische, functionele en constructieve schade zijn niet zo scherp als de indeling in Tabel 1 suggereert:

1. Schadeklasse 0, waarbij sprake is van niet-zichtbare schade, zou ook als 'Geen schade' kunnen worden aangemerkt. Immers, de schade wordt in dat geval niet opgemerkt.
2. Functionele schade kan al optreden bij scheurwijdtes van enkele millimeters (schadeklasse 2 van Burland), zeker als er sprake is van scheuren in buitenmuren. Bij enkele millimeters kan al sprake zijn van vochtdoorslag of wind.
3. Constructieve schade kan al optreden bij scheurwijdtes vanaf ca. 10 mm, of bij langere scheuren, zeker als de scheuren zich bevinden in dragende onderdelen.

1.3.3. CLASSIFICATIE EMS (1998) - VEILIGHEID

In opdracht van de Europese Commissie is in 1998⁸ een richtlijn opgesteld voor het beoordelen van de zwaarte van een aardbeving op basis van de gevolgen voor de veiligheid in gebouwen. Hierbij worden gebouwen ingedeeld in vijf schadeklassen, zie Tabel 2. Deze klasse-indeling wordt vaak gebruikt bij het beoordelen van schades van aardbevingen.

Tabel 2 Schadeklassen (DS = Damage State)

Metselwerk gebouwen	Betonnen gebouwen	Omschrijving
		DS1: Geen of lichte schade Geen constructieve schade, lichte niet-constructieve schade. Haarscheurtjes in weinig muren, vallen van kleine delen sierpleister.
		DS2: Matige schade Lichte constructieve schade, matige niet-constructieve schade. Scheuren in veel muren, vallen van grote delen pleisterwerk, beton of voegmortel, gedeeltelijk instorten van schoorstenen.
		DS3: Zware schade Matige constructieve schade, zware niet-constructieve schade. Lange en grote scheuren in de meeste muren, vallende pannen, schoorstenen breken volledig af, wandpanelen vallen omlaag.
		DS4: Zeer zware schade Zware constructieve schade, zeer zware niet-constructieve schade. Bezwijken van muren of dragende kolommen, gedeeltelijk bezwijken van daken en vloeren.

⁸ G. Grünthal (red.), *European Macroseismic Scale 1998*, Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Walferdange (LU), 1998

		DS5: Verwoesting Zeer zware constructieve schade. Totaal of vrijwel totaal bezwijken van (delen van) het gebouw
---	---	---

1.4. TE GEBRUIKEN DEFINITIES EN CLASSIFICATIE

Bij het classificeren van schades bij een bouwkundige opname adviseren we om de hiervoor in paragraaf 1.3.1 gebruikte definities te hanteren, en onderscheid te maken tussen esthetische, functionele en constructieve schade, gebruik makend van onderstaande kenmerken:

0. Geen schade, kenmerken zijn:

- a. Schades zijn niet zichtbaar

1. Esthetische schade, kenmerken zijn:

- a. Kleine scheuren (0.1 tot max. 5 mm scheurwijdte). **Let op:** ook onder 5 mm scheurwijdte kan al sprake zijn van functionele schade, als er sprake is van vochtdoorslag of vermindering van isolatiewaarde
- b. Voornamelijk in pleisterwerk en voegwerk, volgt doorgaans de voeg
- c. Geen sprake van vochtdoorslag of vermindering van isolatiewaarde (dus geen open scheur in buitengevel)
- d. Licht klemmen van ramen en deuren
- e. Herstel is eenvoudig, bijv. met voegmortel of sierpleister.

2. Functionele schade, kenmerken zijn:

- a. Middelgrote scheuren (ca. 3 tot max. 25 mm scheurwijdte, of groot aantal kleinere scheuren). **Let op:** ook onder 25 mm scheurwijdte kan al sprake zijn van constructieve schade, als er sprake is van verlies van de constructieve sterkte van gebouw(onderdelen)
- b. In pleisterwerk, voegwerk en metselwerk
- c. Verlies van functionaliteit van gebouw (denk aan afname isolatiewaarde, vochtdoorslag, minder toegankelijk door scheefstand), maar nog geen verlies van constructieve sterkte.
- d. Ramen en deuren klemmen, gebouw en muren staan scheef
- e. Herstel is ingewikkelder, bijv. met voegmortel, sierpleister en het vervangen van bakstenen

3. Constructieve schade, kenmerken zijn:

- a. Grote scheuren (meer dan ca. 15 mm scheurwijdte, of groot aantal kleinere scheuren).
- b. Verlies van constructieve samenhang, constructieve sterkte en (gedeeltelijk) instortingsgevaar.
- c. Constructie moet worden ondersteund, delen van het gebouw of (in ernstige gevallen) het gehele gebouw kunnen instorten
- d. Herstel is complex, bijv. door delen van het gebouw te vervangen of het gebouw te slopen en te herbouwen.

De globale samenhang tussen bovenstaande classificaties, die van Burland (1995) en de damage states uit het EMS (1998) is weergegeven in Tabel 3. Hierbij is aangesloten bij de definities vanuit

TNO (2023)⁹. De zwaardere schadeklassen uit de EMS (1998) o.b.v. gevolgen (DS3 en hoger) zien we pas optreden bij hoge trillingen (zware aardbevingen en incidenteel bij zware bouwwerkzaamheden) of sterke zettingen.

Tabel 3 Globale relatie tussen schadeklassen van Burland (1995) en EMS (1998) en de in deze notitie voorgestelde schade classificaties

Geen schade	Esthetisch	Functioneel	Constructief	Schadeklasse	Scheurgrootte	Omschrijving schadebeeld	Benodigde herstelactie	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5
				0	< 0.1 mm	Niet zichtbare schade	Geen actie nodig					
				1	0.1 - 1 mm	Zeer lichte scheurvorming. Scheuren in pleisterwerk, nauwelijks zichtbaar in metselwerk.	Indien gewenst aan binnenzijde wegwerken met behang, verf of sierpleister.					
				2	1 - 5 mm	Lichte scheurvorming. Scheuren kunnen aan buitenzijde zichtbaar zijn en vochtdoorslag geven. Deuren en ramen klemmen licht.	Herstellen met sierpleister of voegmortel, terugkerende scheuren eventueel met wapeningsband. Ramen en deuren bijstellen.					
				3	5 - 15 mm of meerdere scheuren > 3 mm	Matige scheurvorming. Vochtdoorslag en schade aan nutsaansluitingen mogelijk. Klemmende ramen en deuren.	Scheuren in metselwerk herstellen met voegmortel of door stenen te vervangen. Constructie waterdicht maken en ramen en deuren bijstellen.					
				4	15 - 25 mm, kleiner bij meer scheuren	Ernstige scheurvorming. Bruikbaarheid en toegankelijkheid van gebouw ernstig beperkt, gebouw en muren staan scheef.	Herstellen door vervangen van (delen van) muren of andere onderdelen van het gebouw, vooral boven muren en ramen.					
				5	> 25 mm, kleiner bij meer scheuren	Zeer ernstige scheurvorming. Instortingsgevaar, constructie moet worden ondersteund.	Volledige renovatie, of sloop en herbouw noodzakelijk.					

Tenslotte, merk op dat schade op de langere termijn door belasting, verwerking en werking van vocht kan verergeren naar een zwaardere schadeklasse.

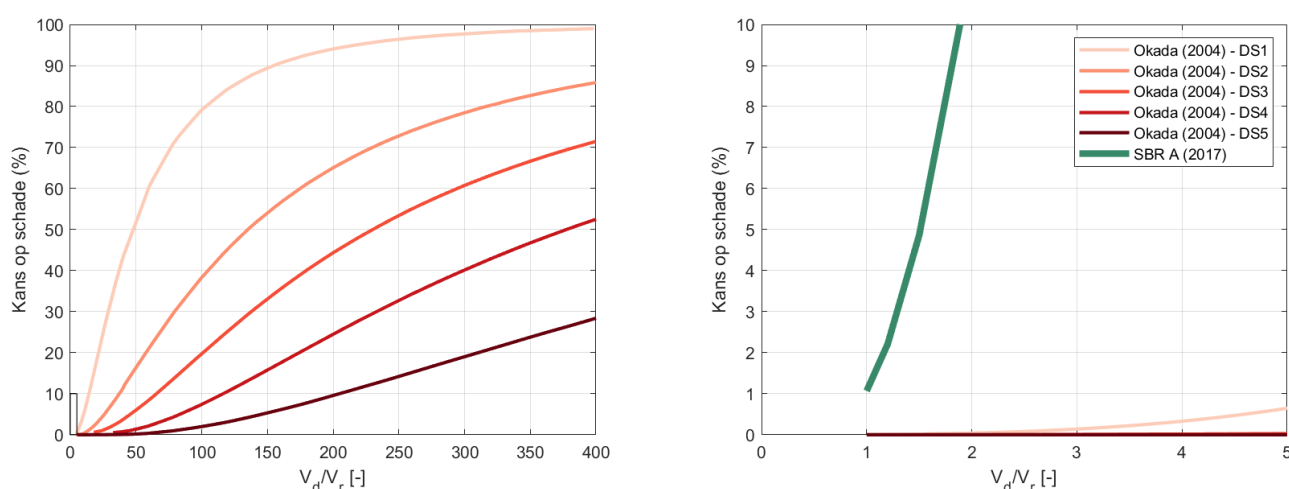
⁹ Geurts, C.P.W. et al, *Typologie-gebaseerde beoordeling van de veiligheid bij aardbevingen in Groningen - Typologisch toedelen*, TNO, 2021

2. TRILLINGEN EN SCHADEKLASSES

In dit hoofdstuk gaan we in op de relatie tussen trillingen en de in hoofdstuk 1 benoemde schadeklassen, zoals die in de literatuur en praktijkvoorbeelden worden gehanteerd. Op basis daarvan doen we een voorstel m.b.t. de kans op schade in een bepaalde klasse op basis van de gemeten trillingswaarden.

2.1. BUITENLANDSE LITERATUUR

Buitenlandse literatuur over de relatie tussen trillingen en schade is vrijwel uitsluitend gerelateerd aan schade door tektonische aardbevingen¹⁰, waarbij de kwetsbaarheidcurves zijn gekalibreerd op praktijkdata. In een aantal Japanse onderzoeken zijn deze kwetsbaarheidcurves vergeleken met aardbevingen in Turkije en Japan^{11,12}. De kwetsbaarheidcurves voor de schadeklassen o.b.v. gevolgen (DS1 t/m DS5) zijn weergegeven in Figuur 1. De kans op lichte schade (DS1) begint pas op te lopen boven 5 maal de grenswaarde uit de SBR A:2017.



Figuur 1. Kwetsbaarheidcurves voor schadeklassen DS1 t/m DS5, links gehele bereik, rechts ingezoomd tot 5 keer de grenswaarde V_r uit de SBR A:2017 (categorie 2, kortdurende trillingen)

Vergeleken met deze kwetsbaarheidcurves is de SBR A:2017 erg conservatief (dus grotere kans op schade bij lagere trillingen). Mogelijke verklaringen in de literatuur hiervoor zijn¹³:

1. **Verskil in bouwaard.** Het slankere Nederlandse metselwerk komt in het buitenland (vrijwel) niet voor, en de (vooral in oudere woningen voorkomende halfsteense metselwerk constructies) wordt in alle buitenlandse aardbevingsrichtlijnen afgeraden. Schadecurves uit het buitenland zijn dus bepaald op basis van gebouwen die al redelijk bestand zijn tegen aardbevingen, omdat in de bouw al rekening is gehouden met het voorkomen van aardbevingen.

¹⁰ G. Grünthal (red.), *European Macroseismic Scale 1998*, Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Walferdange (LU), 1998

¹¹ S. Okada and N. Takai, *Classifications of structural types and damage patterns of Buildings for earthquake field investigation*, 2000

¹² S. Okada and N. Takai, *Damage index functions of wooden buildings and Reinforced buildings for seismic risk management*, 2004

¹³ Zie onder meer Staalduinen, P.C. van et al., *Onderzoek naar de oorzaken van bouwkundige schade in Groningen, Methodologie en case studies ter duiding van de oorzaken*, TU Delft, 2019

2. **Verskil in funderingswijze.** In Nederland zijn met name oudere gebouwen regelmatig op staal gefundeerd op een weinig draagkrachtige ondergrond. Hierdoor is de gevoeligheid voor zettingen, die door trillingen kunnen ontstaan of verergeren, groter dan in het buitenland met een vaak veel draagkrachtiger ondergrond.

TU Delft concludeert in haar onderzoek¹⁴ naar de kans op schade door aardbevingen (uitgevoerd in het kader van de problematiek in Groningen) dat de kans op schade, met name bij lage trillingsniveaus, in Nederland bij DS1-schades een orde hoger ligt dan op basis van buitenlandse onderzoeken wordt aangenomen.

Een derde reden voor het verschil tussen de SBR A:2017 en de DS-curves is:

3. **Verskil in vertrekpunt:** de SBR A:2017 gaat over *aansprakelijkheid*, niet over *constructieve veiligheid*. In het buitenland wordt meer waarde gehecht aan het correct beschrijven van matige tot ernstige schades, dus waar de (constructieve) veiligheid in het geding is. Kwetsbaarheidcurves zijn daarom vooral gevalideerd voor zwaardere schadeklassen, afkomstig uit beschrijvingen van aardbevingen (waarbij de trillingen vele malen hoger liggen dan de trillingen van treinen). Het schadeniveau DS1 (haarscheuren), waar de grenswaarden van de SBR-A op zijn gebaseerd, is bij tektonische aardbevingen niet van belang.

Gelet op bovenstaande zijn de buitenlandse curves niet goed bruikbaar voor de Nederlandse situatie.

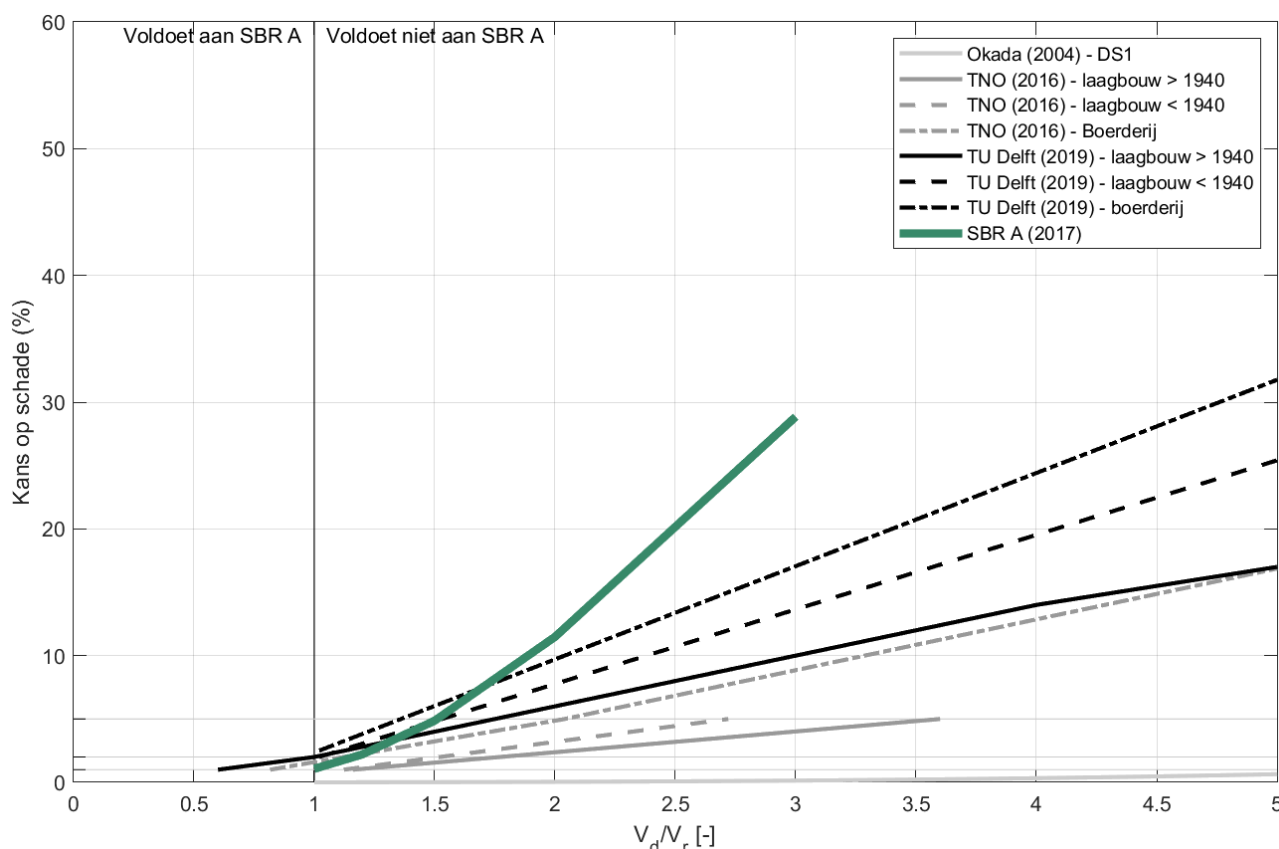
2.2. NEDERLANDSE LITERATUUR

In Nederlandse literatuur zien we vanaf ongeveer de jaren '90 meer aandacht voor kwetsbaarheidcurves, onder meer geïnitieerd door steeds vaker voorkomende bouwschade, de aardbevingen in Roermond en vanaf circa 2012 (geïnduceerde beving in Huizinge) ook in het kader van de bevingen vanuit de gaswinning in het Groningenveld. Veel curves zijn gebaseerd op metingen en schade-opnames (schadevastlegging op basis van metingen en inspecties), maar de laatste jaren komen ook steeds meer modelstudies beschikbaar.

Veelgebruikte kwetsbaarheidcurves (afgezet tegen de grenswaarde uit de SBR A:2017) voor gemeten trillingen zijn weergegeven in Figuur 2. Hierbij hebben we de meer recente curves (die gebaseerd zijn op meer data) donkerder weergegeven dan de oudere data. Hier valt het volgende op:

1. De SBR A-curve is relatief conservatief. Alleen in het gebied tussen 1.0 en 1.6 keer de grenswaarde heeft de recente TU Delft-studie uit 2019 iets hoger schadekansen. De SBR A-curve verloopt veel steiler, oftewel sneller grotere schadekansen bij hogere trillingsniveaus.
2. De praktijkonderzoeken uit 2016 en 2019 laten zien dat boerderijen kwetsbaarder zijn dan andere vooroorlogse laagbouw, en naoorlogse laagbouw weer minder kwetsbaar dan vooroorlogse laagbouw.

¹⁴ Staaldunin, P.C. van et al., *Onderzoek naar de oorzaken van bouwkundige schade in Groningen, Methodologie en case studies ter duiding van de oorzaken*, TU Delft, 2019



Figuur 2. Kwetsbaarheidscures in Nederlandse empirische onderzoeken, gericht op ontstaan van schade^{15,16,17}

In Figuur 3 zijn kwetsbaarheidscures op basis van **modelonderzoeken** weergegeven. De oudere curves van Waarts (1997) geven vooral bij beperkte overschrijdingen hogere schadekansen, maar verlopen vlakker (schadekans neemt niet zo snel toe met hogere trillingswaarden). In recente onderzoeken¹⁸ is aangetoond dat deze curves erg gevoelig zijn voor aannames in de modelparameters van bijvoorbeeld het metselwerk. Recent onderzoek van Korswagen (2022) is specifiek gericht op de vraag wanneer scheuren kunnen ontstaan of groeien. Het onderzoek van Korswagen laat zien dat de SBR A:2017 ook op basis van modelstudies over het algemeen conservatief is. Wel zien we dat de curve voor 'onzichtbare schade wordt zichtbaar' hogere schadekansen kent dan de SBR A:2017: vanaf ca. 2/3^e van de grenswaarde uit de SBR A:2017 kunnen zorgen voor het zichtbaar worden van onzichtbare schade¹⁹. Belangrijk hierbij is dat het om een enkele modelstudie gaat en dat het niet goed mogelijk is om dit op basis van empirie te onderbouwen; onzichtbare schade kan immers niet worden waargenomen.

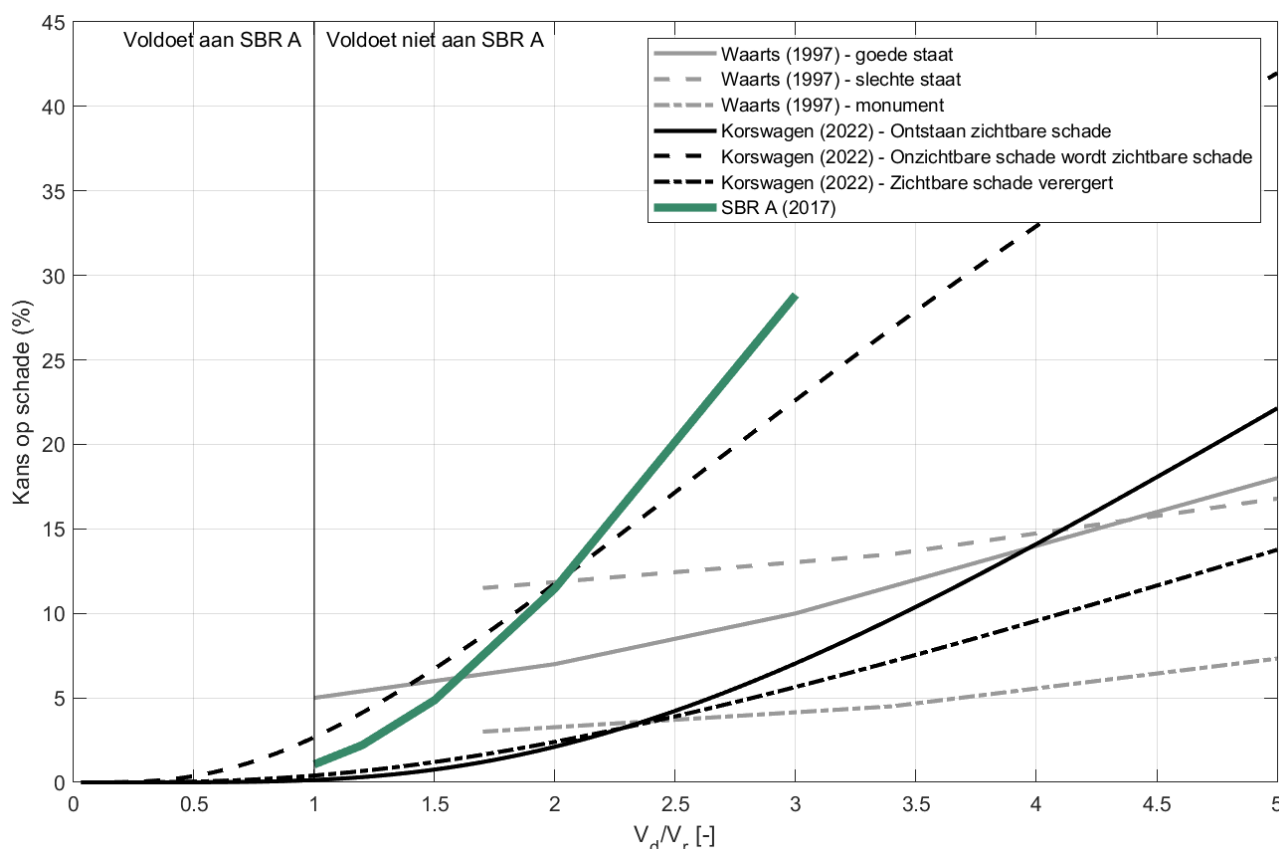
¹⁵ S. Okada and N. Takai, *Damage index functions of wooden buildings and Reinforced buildings for seismic risk management*, 2004

¹⁶ Dr. ir. C.P.W. Geurts en prof. dr. ir. R.D.J.M. Steenbergen, *Relatie tussen PGA waarden en kans op schade voor geïnduceerde aardbevingen in Groningen*, TNO, 2016. Grafiek is geproduceerd met $\gamma_t = 1.0$ (SBR A:2017, kortdurende Trillingen) en voor monumenten, gebouwen < 1940 en gebouwen in slechte staat $\gamma_v = 1.7$ (SBR A:2017, voor trillingsgevoelige gebouwen).

¹⁷ P.C. van Staalduinen et al, *Onderzoek naar de oorzaken van bouwkundige schade in Groningen, Methodologie en case studies ter duiding vande oorzaken*, TU Delft, 2019. Grafiek is geproduceerd met $\gamma_t = 1.0$ (SBR A:2017, kortdurende Trillingen) en voor monumenten, gebouwen < 1940 en gebouwen in slechte staat $\gamma_v = 1.7$ (SBR A:2017, voor trillingsgevoelige gebouwen).

¹⁸ L. Hellebrandt en C.P.W. Geurts, *Herziening SBR Richtlijn A: Literatuurstudie*, TNO, 2016

¹⁹ Ook door het Instituut Mijnbouwschade Groningen wordt deze factor gehanteerd, zie de Werkinstructie "Verergering door trillingen" van 22 maart 2023



Figuur 3. Kwetsbaarheidcurves in Nederlandse modelonderzoeken, gericht op het ontstaan van schade^{20,21}

Verder is het goed om te realiseren dat deze kwetsbaarheidscurves bedoeld zijn voor een risico-inschatting (dus: bij hoeveel gebouwen verwacht je een bepaald type schade bij een gegeven trilling). De curves zijn niet opgesteld om voor individuele schades te beoordelen hoe groot de kans is dat deze door trillingen zijn ontstaan. Als indicatie zijn ze hier echter wel bruikbaar voor.

Tenslotte, zoals eerder al beschreven staat de grenswaarde uit de SBR A:2017 voor 1 procent kans op schade. Daarmee sluit de SBR A:2017 schade onder de grenswaarde niet volledig uit, maar de kans erop is klein en beperkt tot uitzonderlijke gevallen. Dat betekent echter niet dat de trillingen niet hebben kunnen bijdragen aan de schade, wel dat er andere fenomenen in de meeste gevallen een belangrijkere rol hebben gespeeld in het ontstaan van de schade. Dat leggen we hieronder verder uit:

- In een gebouw kan het zijn dat er in het ene onderdeel vanaf de bouw al meer spanning zit dan in het andere onderdeel. Dit kan komen door oorzaken als verschil in materiaal, al aanwezige vervormingen en belasting van de constructie. Het gaat dan om zogenaamde statische of quasi-statische belastingen, die weinig variatie kennen door de tijd.
- Verder kan het zo zijn dat in het ene onderdeel sneller sprake is van een opbouw van spanning dan in het andere onderdeel, bijvoorbeeld doordat het ene onderdeel meer bloot staat aan veroudering en weersinvloeden. Tijdelijke belastingen, zoals een zware storm, hevige sneeuwval of trillingen (van bijvoorbeeld treinen) zorgen voor tijdelijk extra spanningsopbouw.

²⁰ P.H. Waarts, *Kans op schade aan bouwwerken door trillingen*, TNO-rapport 97-CON-R1698, 1997. Grafiek is geproduceerd met $\gamma_t = 1.0$ (SBR A:2017, kortdurende Trillingen) en voor monumenten en gebouwen in slechte staat $\gamma_v = 1.7$ (SBR A:2017, voor trillingsgevoelige gebouwen).

²¹ Paul A. Korswagen et al, *Fragility curves for light damage of clay masonry walls subjected to seismic vibrations*, Bulletin of Earthquake Engineering, 2022. Grafiek is geproduceerd met $\gamma_t = 1.0$ (SBR A:2017, kortdurende Trillingen) en voor monumenten en gebouwen in slechte staat $\gamma_v = 1.7$ (SBR A:2017, voor trillingsgevoelige gebouwen).



Ook hierbij geldt dat het ene onderdeel van een gebouw hier gevoeliger voor kan zijn dan het andere onderdeel, bijvoorbeeld door verschillen in gebruikt materiaal of initiële spanning.

- Elk onderdeel van een gebouw kent een grenstoestand: de maximaal toelaatbare spanning. Die is lastig te bepalen en afhankelijk van veel parameters, maar ergens zal elk materiaal een keer bezwijken: als de spanning hoger wordt dan de toelaatbare spanning.
- Omdat de opgebouwde spanning in een gebouwonderdeel van veel factoren afhangt (waaronder de trillingen van treinen), is het lastig om de toerekenbaarheid van treintrillingen objectief vast te stellen. Treintrillingen moeten worden gezien als een belasting die tijdelijk aanwezig is en weer verdwijnt, bovenop de hierboven benoemde al aanwezige belastingen. De trillingen van de treinen kunnen hebben bijgedragen aan het ontstaan van de schade, maar dat kan heel beperkt zijn (bijv. 2 procent van de spanningsopbouw komt door treinen, de rest door andere oorzaken) of groot (bijv. 70 procent van de spanningsopbouw komt door treinen, de rest door andere oorzaken). In beide gevallen kan het zo zijn dat een treinpassage het moment van bezwijken vormt ('het laatste tikje'), maar in het tweede geval zijn de treintrillingen als hoofdoorzaak aan te wijzen, in het eerste geval niet.

Bovenstaande toelichting laat zien waarom het complex kan zijn om de toerekenbaarheid van trillingen aan een schade expliciet te maken. Voor het beoordelen van de invloed van de trillingen op een gebouw kan het helpen om drie situaties te onderscheiden, afhankelijk van de hoogte van de trillingen:

1. De trillingen zijn zodanig laag, dat schade redelijkerwijs is uit te sluiten als de trillingen lager zijn dan deze waarde. In dit geval is er vrijwel altijd een andere oorzaak aan te wijzen van de schade die deze schade zelfstandig heeft veroorzaakt. Omdat in de SBR A:2017 is gekozen voor een conservatieve (worst-case) grenswaarde, kan worden gesteld dat onder die grenswaarde redelijkerwijs geen sprake is van schade door trillingen.
2. De trillingen zijn zodanig hoog, dat redelijkerwijs mag worden aangenomen dat de trillingen de schade hebben veroorzaakt. Soms zijn er ook dan nog andere oorzaken aan te wijzen, maar dan is voldoende duidelijk dat de trillingen naast die andere oorzaken een belangrijke rol hebben gespeeld bij het ontstaan van de schade.
3. De trillingen liggen tussen beide grenzen in (grijs gebied). In dat geval is op voorhand onduidelijk welke rol de trillingen bij de fysieke schade aan het gebouw hebben gehad. In deze situatie beoordeelt de deskundige op basis van de waarschijnlijkheid van de verschillende mogelijke oorzaken of, en zo ja, in welke mate de trillingen hebben bijgedragen aan het ontstaan of verergeren van de schades. Handvatten hierbij:
 - a. Naarmate er minder overduidelijke alternatieve oorzaken zijn voor het ontstaan van de schade, neemt de kans dat de trillingen een rol hebben gespeeld, toe.
 - b. Naarmate de trillingen hoger zijn (t.o.v. de grenswaarde), neemt de kans dat de trillingen een rol hebben gespeeld, toe.

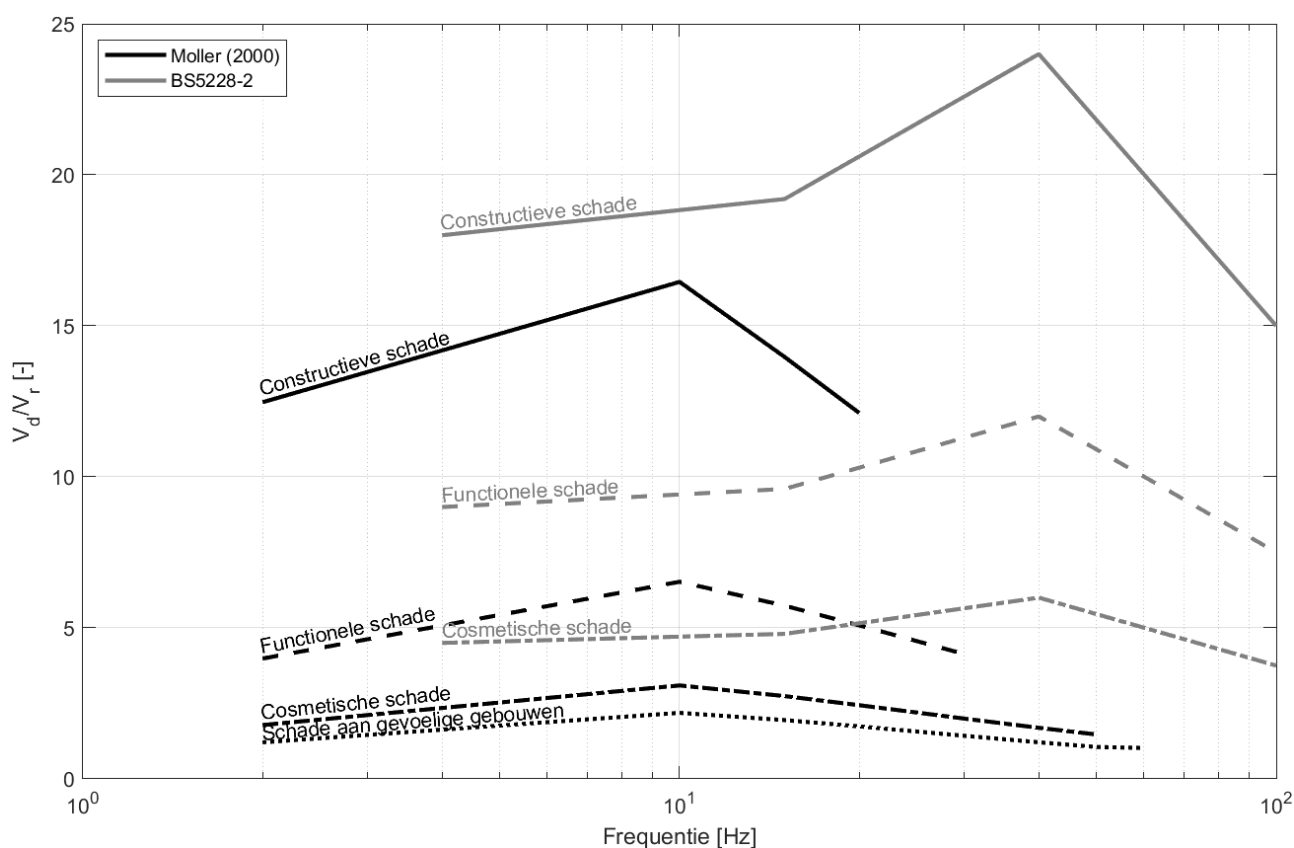
2.3. GRENSWAARDEN VOOR SCHADEKLASSES

Tenslotte hebben we literatuur beschouwd waarin grenswaarden voor schadeklassen (zoals gedefinieerd in het vorige hoofdstuk) zijn gegeven. Opgemerkt moet worden dat hierover relatief weinig literatuur beschikbaar is, dus dat deze slechts als indicatie zijn te beschouwen. Alleen in BS5228-2 (2014) en in een rapport van Moller (2000) is hier informatie over voorhanden, hoewel de classificatie van de schadeklassen in het rapport van Moller (2000) niet nauwkeurig is omschreven. De verhouding tot de SBR A-grenswaarde per schadeklasse is weergegeven in Figuur 4.

TNO (2021)²² noemt als ondergrens voor het ontstaan van constructieve schade een trillingssnelheid van 30 mm/s, maar relateert dat niet aan de gevoeligheid van gebouwen of het type trillingsbron, maar indicatief is dat een factor 10 hoger dan de grenswaarde uit de SBR A:2017.

Op basis van de literatuur kan het volgende worden gesteld:

1. Esthetische schade kan ontstaan vanaf de grenswaarde uit de SBR A:2017. Onder de grenswaarde is het ontstaan van schade zeer onwaarschijnlijk.
2. Functionele schade kan ontstaan vanaf trillingsniveaus die ongeveer een factor 4 boven de grenswaarde liggen (met dus een schadekans op basis van de SBR A:2017 van meer dan 30 procent)
3. Constructieve schade kan ontstaan vanaf trillingsniveaus die een ongeveer een factor 10 boven de grenswaarde liggen.



Figuur 4. Schadeklassen en verhouding tot grenswaarden uit de SBR A:2017^{23,24}

2.4. LEEMTEN IN KENNIS

Ondanks de grote hoeveelheid literatuur die de laatste jaren beschikbaar is gekomen, is het niet mogelijk om in alle gevallen harde uitspraken te doen over het wel of niet ontstaan van schades en de indeling in schadeklassen. Deskundigheid van de bouwkundig expert die de opname beoordeelt, blijft daarmee een belangrijke vereiste.

Daarnaast zien we een aantal leemten in kennis waar nader onderzoek naar nodig is:

²² Geurts, C.P.W. et al, *Schade aan gebouwen door spoorwegtrillingen*, TNO, 2021

²³ Möller, B., Larsson, R., Bengtsson, P-E. & Moritz, L., *Geodynamik i praktiken*, Statens geotekniska institut, Information 17, Linköping, Sweden, 2000

²⁴ Code of practice for noise and vibration control on construction and open sites – Part 2: Vibration, BS 5228-2:2009+A1:2014 (2014)

- De in deze notitie voorgestelde grenswaarden voor het ontstaan van functionele en constructieve schade moeten als indicatief worden gezien. Er is maar zeer beperkt literatuur beschikbaar die deze schadeklassen verbindt met optredende trillingswaarden.
- Het is vanuit de literatuur niet duidelijk of de grenswaarde voor het ontstaan van functionele of constructieve schade lager ligt bij gebouwen waar al sprake is van schade. Onduidelijk is of de indeling vanuit de SBR A:2017 voor trillingsgevoelige gebouwen (factor 1.7 strengere grenswaarde voor gebouwen waar al sprake is van schade) hier voldoende rekening mee houdt.
- De kwetsbaarheidcurves die in de Nederlandse literatuur beschikbaar zijn (en ook die in de SBR A:2017 wordt gebruikt), zijn gebaseerd op schade door trillingen van aardbevingen (en in mindere mate van bouwwerkzaamheden), terwijl het niet noodzakelijkerwijs zo is dat de trillingen van treinverkeer bij vergelijkbare trillingen tot vergelijkbare schadekansen leiden. Niet alleen is de trilling van een aardbeving heel anders (het gebouw ervaart niet alleen een trilling, maar ook een impulsvormige 'verplaatsing' en de kans op zettingen is vaak ook groter), ook is de herhaalfrequentie van aardbevingen veel lager dan van treintrillingen (waarbij vaak meerdere keren per dag een trein met vergelijkbare trillingen passeert). Het kan daarom zo zijn dat de gebruikte kwetsbaarheidscures de kans op schade bij treintrillingen te hoog of te laag inschatten.

LITERATUUR

- Burland (1995) *Assessment of damage in low-rise buildings*, BRE Digest 251, 1995
- BS5228-2 (2014) Code of practice for noise and vibration control on construction and open sites – Part 2: Vibration, BS 5228-2:2009+A1:2014, 2014
- De Vent (2011) Vent, I.A.E. de. *Structural damage in masonry, Developing diagnostic decision support*. Delft University of Technology, 2011
- EMS (1998) G. Grünthal (red.), *European Macroseismic Scale 1998*, Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Walferdange (LU), 1998
- Korswagen (2022) Paul A. Korswagen et al, *Fragility curves for light damage of clay masonry walls subjected to seismic vibrations*, Bulletin of Earthquake Engineering, 2022
- Moller (2000) Möller, B., Larsson, R., Bengtsson, P-E. & Moritz, L., *Geodynamik i praktiken*, Statens geotekniska institut, Information 17, Linköping, Sweden, 2000
- Okada (2000) S. Okada and N. Takai, *Classifications of structural types and damage patterns of Buildings for earthquake field investigation*, 2000
- Okada (2004) S. Okada and N. Takai, *Damage index functions of wooden buildings and Reinforced buildings for seismic risk management*, 2004
- TNO (1991) *Trillingscriteria m.b.t. schade aan gebouwen*, TNO, 1991
- TNO (2016) L. Hellebrandt en C.P.W. Geurts, *Herziening SBR Richtlijn A: Literatuurstudie*, TNO, 2016
- TNO (2016) Dr. ir. C.P.W. Geurts en prof. dr. ir. R.D.J.M. Steenbergen, *Relatie tussen PGA waarden en kans op schade voor geïnduceerde aardbevingen in Groningen*, TNO, 2016
- TNO (2020) Dr. ir. C.P.W. Geurts en A. Roszas, *A revision of ProRail's damage-protocol on train induced vibration in the light of new measurement data*, TNO, 2020
- TNO (2021) Geurts, C.P.W. et al, *Schade aan gebouwen door spoorwegtrillingen*, TNO, 2021
- TNO (2023) Geurts, C.P.W. et al, *Typologie-gebaseerde beoordeling van de veiligheid bij aardbevingen in Groningen - Typologisch toedelen*, TNO, 2021
- TU Delft (2019) Staaldunin, P.C. van et al., *Onderzoek naar de oorzaken van bouwkundige schade in Groningen, Methodologie en case studies ter duiding van de oorzaken*, TU Delft, 2019
- Waarts (1997) P.H. Waarts, *Kans op schade aan bouwwerken door trillingen*, TNO-rapport 97-CON-R1698, 1997