

Achtergronden van de kans op schade aan gebouwen bij toetsing aan modelmatige beschrijvingen van trillingen door geïnduceerde bevingen

Piet van Staalduinen – 22 maart 2022

Inleiding

Trillingen als gevolg van geïnduceerde aardbevingen kunnen leiden tot schade aan gebouwen. De sterkte van de trillingen op de locatie van het gebouw is, naast de bouwkundige eigenschappen van het gebouw zelf, de beste indicator voor de waarschijnlijkheid dat trillingen schade aan een gebouw kunnen veroorzaken. Bij de beoordeling van de schadelijkheid van trillingen wordt door diverse instanties en deskundigen gebruik gemaakt van kansen. Zo is er de kans dat schade aan een gebouw optreedt door een trilling, maar ook de kans dat de sterkte van een trilling als gevolg van een aardbeving een bepaalde waarde overschrijdt. Dit zijn verschillende begrippen, die in de juiste context moeten worden gehanteerd. In deze notitie worden de achtergronden behandeld van deze kansbegrippen en wordt ingegaan op de wijze waarop deze kansen kunnen worden bepaald.

De notitie behandelt eerst de modelmatige beschrijving van de trillingen als gevolg van geïnduceerde bevingen. Vervolgens wordt ingegaan op schade door trillingen aan een gebouw. Daarbij wordt onderscheid gemaakt in enerzijds een bekende trilling, dat is een trilling die daadwerkelijk is vastgesteld en gemeten en anderzijds een onbekende trilling, waarover alleen op basis van modellen in statistische termen iets te zeggen valt. Dit laatste is meestal het geval bij aardbevingen. De notitie licht specifiek toe hoe in het geval van trillingen die alleen modelmatig gekenmerkt kunnen worden de kans op schade kan worden vastgesteld.

Modelmatige beschrijving van aardbevingstrillingen aan het aardoppervlak

De afgelopen jaren zijn de geïnduceerde bevingen in Groningen op steeds grotere schaal gemeten door een seismisch meetnet van versnellingsensoren, dat is ingericht door het KNMI. Op basis van de waarnemingen in dit seismisch meetnet zijn diverse rekenmodellen opgesteld, die de sterkte van de trillingen als functie van de afstand tot het epicentrum van de beving en van de magnitude van de beving beschrijven. Met name genoemd worden hier de modellen Bommer 2016¹, Bommer 2017², Bommer 2019³, KNMI/BMR2⁴ en Bommer 2021⁵. Deze modellen geven een beschrijving van de

¹ Julian J. Bommer, Peter J. Stafford & Michail Ntinalexis, *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*, November 2016

² Julian J. Bommer, Peter J. Stafford & Michail Ntinalexis, *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 smaller earthquakes*, November 2017.

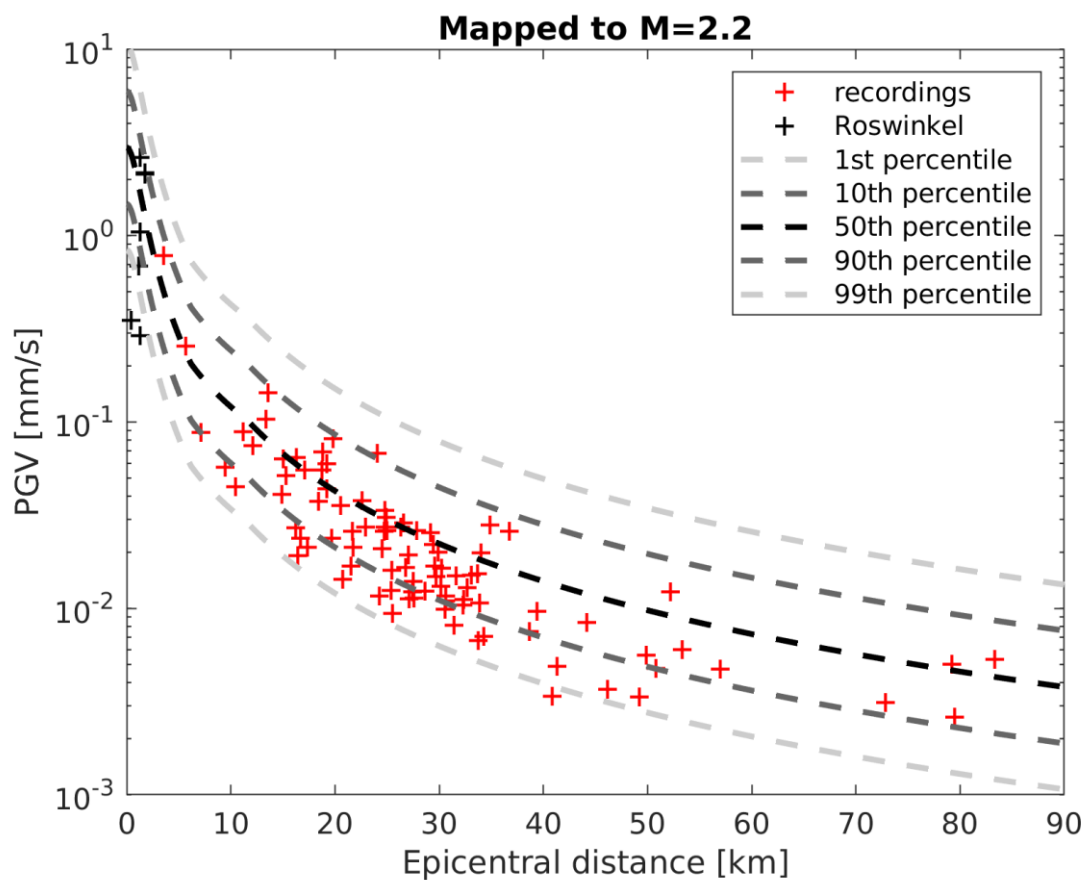
³ Julian J. Bommer, Peter J. Stafford & Michail Ntinalexis, *Empirical Ground-Motion Prediction Equations for Peak Ground Velocity from Small-Magnitude Earthquakes in the Groningen Field Using Multiple Definitions of the Horizontal Component of Motion, Updated Model for Application to Smaller Earthquakes and Corrected for the G-Network Accelerograph Calibration Error*, Maart 2019

⁴ E. Ruigrok, B. Dost, *Advice on the computation of peakground-velocity confidence regions for events in gas fields other than the Groningen gas field*, KNMI, De Bilt, 30 juni 2020

⁵ Julian J Bommer, Peter J Stafford & Michail Ntinalexis, *Empirical Equations for the Prediction of Peak Ground Velocity due to Induced Earthquakes in the Groningen Gas Field*, 10 October 2021.

grootte van de trillingen aan het aardoppervlak. De trillingen worden gekwantificeerd met de trillingsnelheid.

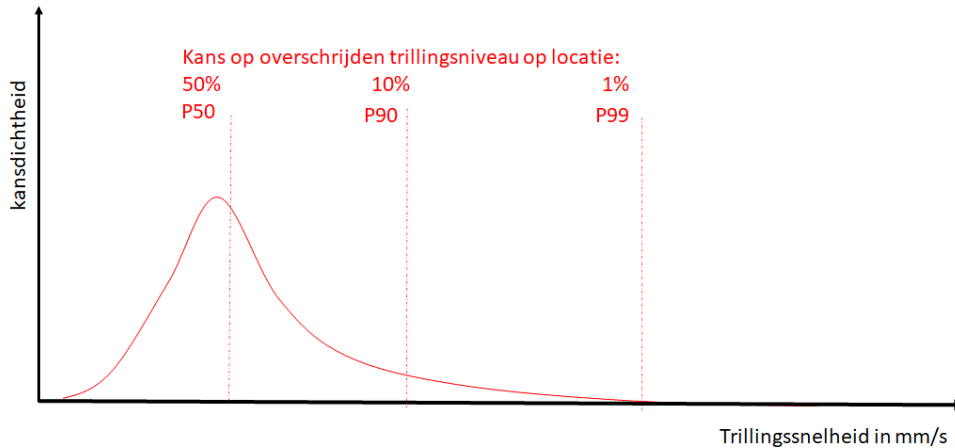
Figuur 1 is ontleend aan de publicatie van Ruijgrok en Dost (zie voetnoot 4) en geeft een indruk van de gemeten topwaarden van de trillingen (uitgedrukt in de snelheid van de trilling of *Peak Ground Velocity*, PGV) als functie van de afstand in een groot aantal meetpunten als gevolg van een geïnduceerde beving. Uit figuur 1 blijkt dat er een puntenwolk ontstaat rondom de 50^e percentiel van het beschrijvende model. Hierboven kunnen diverse niveaus worden aangegeven. Hoe hoger het niveau, des te kleiner de kans dat hier waarnemingen boven liggen. De figuur toont onder meer de 1^e en 10^e percentiel.



Figuur 1: afbeelding van de gemeten topwaarden van trillingen in het KNMI sensor netwerk als functie van de afstand tot het epicentrum met daarbij de betrouwbaarheids grenzen van het BMR2 model. Figuur ontleend aan de KNMI publicatie genoemd in voetnoot 4.

Gemeenschappelijk kenmerk van alle genoemde modellen is dat deze voor historische geïnduceerde bevingen een modelbeschrijving bevatten, waarmee de contourlijnen met een onder- of overschrijdingskans van een bepaalde trillingsnelheid kunnen worden vastgesteld op basis van de afstand tot het epicentrum. De trillingen op een zekere afstand tot het epicentrum en bij een bepaalde magnitude hebben een lognormale kansverdeling. Figuur 2 geeft schematisch de kansdichtheid aan van de sterkte van de trillingen aan het aardoppervlak (PGV), met daarbij indicatief de sterkte van de trillingen met een overschrijdingskans van 1%, 10% en 50%.

De hier besproken modellen kennen ook ten aanzien van de representatie van de trillingssnelheid aan het aardoppervlak nog weer verschillende varianten. Voor zover in deze notitie niet anders is aangegeven, is hierna steeds gebruik gemaakt van de variant *MaxRot* die in alle modelbeschrijvingen voorkomt.



Figuur 2: Schematische weergave van de kansdichtheidsfunctie voor de topwaarden van de trillingen op een bepaalde afstand en bij een bepaalde magnitude volgens de modellen genoemd in voetnoten 1 tot en met 5.

In de kansrekening is de lognormale verdeling de kansverdeling van een stochastische variabele waarvan de logaritme normaal verdeeld is. De parameters van de lognormale verdeling zijn μ en σ .

De kansdichtheid voor de stochast S die de sterkte van de trilling weergeeft, is gegeven door:

$$f_S(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x)-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

De mediaan van S is: e^μ

Het gemiddelde van S is: $e^{\mu+\frac{\sigma^2}{2}}$

De standaardafwijking van S is: $\sqrt{(e^{\sigma^2} - 1) e^{2\mu+\sigma^2}}$

Voor de parameters van de modelmatig bepaalde lognormale verdelingsfuncties voor de sterkte van de trillingen bij geïnduceerde bevingen wordt verwezen naar de publicaties waarin de verschillende modellen zijn beschreven. Kenmerk van deze modellen is dat de parameter σ die de spreiding van de verdeling kenmerkt in de regel als vast wordt beschouwd en dat de parameter μ die de ligging van de kansverdeling bepaalt afhankelijk is van de magnitude van de beving en van de afstand tot het epicentrum.

Naast het sensornetwerk van KNMI is in de periode 2015-2020 ook een sensornetwerk van TNO actief geweest⁶. De sensoren van het TNO-netwerk waren geïnstalleerd in of aan de fundering van

⁶ H. Borsje MSc, E.A.F. Langius MSc, c.s. Monitoring Network Building Vibrations, TNO rapport TNO 2015 R10501, 1 april 2015

gebouwen en geven daarmee een indruk van de respons van de fundering van gebouwen. In een rapport van TU Delft⁷ is een vergelijking gepresenteerd van het model Bommer 2019 en de resultaten van het TNO-netwerk. Hieruit kan worden afgeleid dat er goede overeenstemming is tussen de waarnemingen met de KNMI-sensoren waarop het Bommer 2019 model is gebaseerd enerzijds en de TNO sensoren in gebouwen anderzijds.

Kwetsbaarheid van een gebouw - de kans op schade aan een gebouw

Voor de kwetsbaarheid van gebouwen zijn minder uitgebreide en minder systematisch verzamelde gegevens beschikbaar. Voor de kans op schade aan gebouwen wordt in Nederland veel gebruik gemaakt van de SBR-Trillingsrichtlijn deel A⁸. Dit is een meet- en beoordelingsrichtlijn die tot doel heeft schade aan gebouwen door trillingen als gevolg van bouwwerkzaamheden, weg- of railverkeer te voorkomen door het definiëren van meetprotocol en door het stellen van grenswaarden. Bij het stellen van die grenswaarden beoogt SBR Trillingsrichtlijn A de kans op schade aan een gebouw te beperken tot 1 %. In de meest recente revisie van SBR Trillingsrichtlijn A (uitgave 2017) is opgenomen dat deze richtlijn ook voor het beoordelen van trillingen door bevingen kan worden gehanteerd⁹.

De SBR Trillingsrichtlijn A bevat gedifferentieerde criteria voor gebouwen, afhankelijk van het materiaal van de draagconstructies. De meest gevoelige categorie gebouwen betreft gebouwen met een monumentale status of in een gevoelige bouwkundige staat. Daarvoor wordt een grenswaarde van 3 mm/s aangegeven (in geval van eenmalig optredende trillingen met een korte duur) of van 2 mm/s (in geval van herhaald voorkomende kortdurende trillingen met een korte duur).

De SBR Trillingsrichtlijn A geeft naast een criterium voor het beperken van de kans op schade van ten hoogste 1 % alleen *indicaties* over de kans op schade indien de trillingen¹⁰ sterker zijn. Daarmee is er weliswaar enig, maar toch slechts een heel beperkt zicht op de kansverdeling van de schade als functie van de trillingssterkte. Op basis van de in SBR Trillingsrichtlijn A geformuleerde indicaties, kan een lognormale verdeling worden afgeleid die voor een groter bereik aan trillingen de kans op schade beschrijft. Verder is in een publicatie¹¹ van TU Delft een kansverdelingsfunctie gegeven op basis van een eerder gepresenteerd model door Waarts¹² en zijn in een publicatie van Crowley et al¹³ kansverdelingsfuncties gegeven op basis van de schade, die bij de beving in Huizinge (2012) is opgetreden. Figuur 3 geeft schematisch de kansdichtheid aan van de kwetsbaarheid van een gebouw, met daarbij indicatief de sterkte van de trillingen waarbij de kans op schade 1%, 10% en 50% bedraagt.

⁷ TU Delft rapport CM-2018-01 Onderzoek naar de oorzaken van bouwkundige schade in Groningen - Methodologie en case studies ter duiding van de oorzaken, oorspronkelijk gepubliceerd juli 2018, revisie versie mei 2019 TU Delft.

⁸ C.J. Ostendorf, SBR Trillingsrichtlijn A, SBRCURnet, Delft, 2017

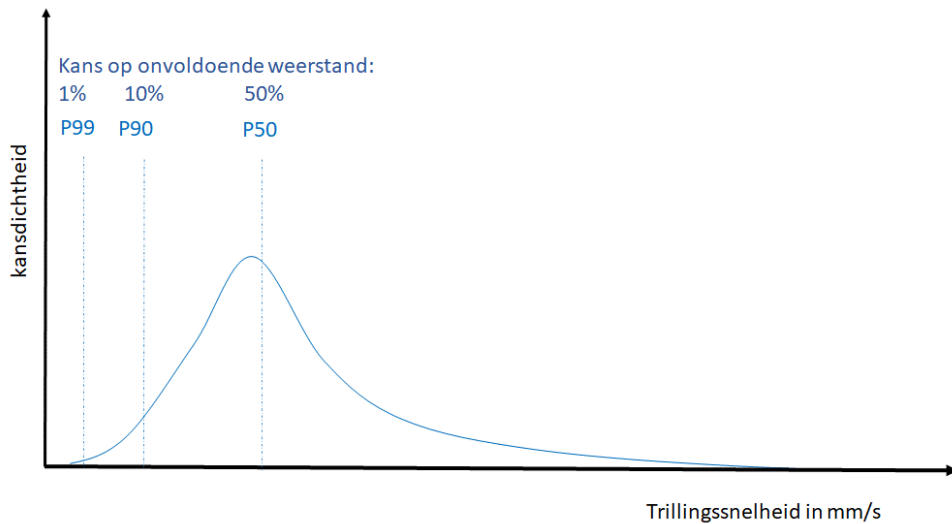
⁹ Zie pagina 14 van de SBR Trillingsrichtlijn A

¹⁰ Zie pagina 52 van de SBR Trillingsrichtlijn A

¹¹ Paul Korswagen Eguren 'Analysis and Reproduction of Waarts' Framework for Probability of Damage Initiation' TU Delft, notitie (v2), 30 januari 2018

¹² P.H. Waarts, Kans op schade aan bouwwerken door trillingen, TNO Rapport 97-CON-R1698, december 1997

¹³ Helen Crowley, Rui Pinho, Jan van Elk, Jeroen Uilenreef, Probabilistic damage assessment of buildings due to induced seismicity, Bulletin of Earthquake Engineering (2019) 17:4495–4516 <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0462-1>



Figuur 3: Schematische weergave van de kansdichtheidsfunctie voor de weerstand van een gebouw, volgens de modellen gebaseerd op of genoemd in voetnoten 8 tot en met 11.

De weerstand tegen trillingen of de kwetsbaarheid van een gebouw wordt weergegeven met de stochast R . Deze stochast is ook verondersteld lognormaal verdeeld te zijn. Op grond van bovenstaande zijn er verschillende varianten, om de kwetsbaarheid van een gebouw in de vorm van een kansfunctie weer te geven:

variant 1 (TU Delft/Waarts - 2019)

$$\mu = 3,17 \text{ en } \sigma = 0,853$$

variant 2 (Indicaties SBR - 2017)

$$\mu = 2,6 \text{ en } \sigma = 0,65$$

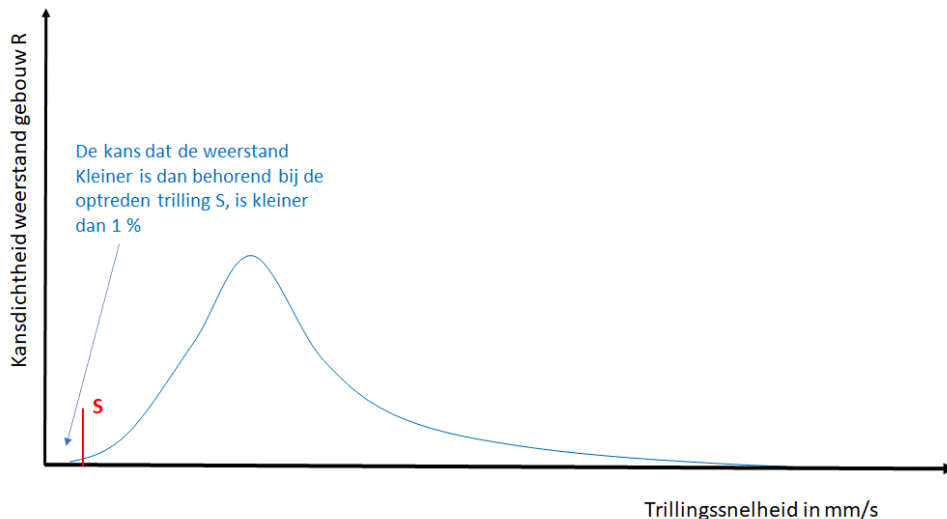
variant 3 (Crowley et al - 2019)

$$\mu = 4,02 \text{ en } \sigma = 1,25$$

De kans op schade aan een gebouw bij een bekende (door meting vastgestelde) trilling

Indien bij een gebeurtenis die trillingen veroorzaakt metingen kunnen worden uitgevoerd om de daadwerkelijk opgetreden sterkte van de trillingen vast te stellen, is het in principe voldoende om aan de hand van de SBR Trillingsrichtlijn A vast te stellen dat de daarin gegeven grenswaarde niet is overschreden. Dan weten we zeker dat de kans op schade kleiner is dan 1 %.

Schade treedt op indien de weerstand van een gebouw, aangegeven met R , kleiner is dan de grenswaarde van de trillingsbelasting die op het gebouw werkt. Dit is schematisch aangegeven in figuur 4 met de verticale rode lijn S .



Figuur 4: Kansdichtheidsfunctie voor de weerstand van een gebouw gecombineerd met een waarneming van de opgetreden topwaarde van de trilling (aangeduid met S).

Links van deze grenswaarde is de weerstand van het gebouw kleiner dan behorend bij het gestelde criterium en zal dus schade optreden. Als we door middel van een meting zeker weten dat de trilling niet sterker is geweest dan de grenswaarde, kunnen we op basis hiervan stellen dat de kans op schade kleiner is dan 1 %.

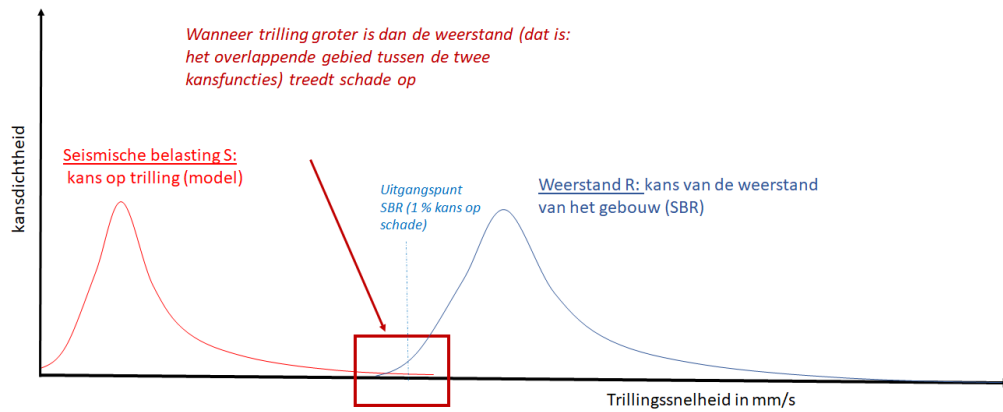
SBR Trillingsrichtlijn A geeft hiervoor een criterium van 5 mm/s voor normale gebouwen in metselwerk en van 3 mm/s voor gevoelige gebouwen of monumentale gebouwen in metselwerk. Aanvullend stelt SBR Trillingsrichtlijn A dat op deze criteria een reductie moet worden toegepast van een factor 1,5, indien het karakter van de trillingen herhaald kortdurend is.

De kans op schade aan een gebouw bij een onbekende trilling (die alleen modelmatig of in statistische termen bekend is)

Het is praktisch niet mogelijk om metingen van trillingen als gevolg van geïnduceerde bevingen uit te voeren aan alle gebouwen in Groningen is. Daarom wordt bij aardbevingen veelal door berekening bepaald welke trillingen op een locatie opgetreden kunnen zijn en wordt op basis daarvan bepaald wat de kans op schade is. In tegenstelling tot de situatie die hiervoor is behandeld, is de sterkte van de trilling is nu geen vast gegeven meer, maar een variabele die alleen in statistische termen kan worden geïnduceerd (gemiddelde, spreiding, verdelingstype).

We gaan hierna in op de vraag is hoe de kans op schade bij een onbekende trilling moet worden bepaald en welke trillingsterkte en met welke kans op overschrijden we hiervoor als criterium moeten hanteren.

Schade treedt op indien de weerstand van een gebouw, aangegeven met R, kleiner is dan de trillingsbelasting die op het gebouw werkt (hier aangegeven met S), zoals schematisch aangegeven in figuur 5.



Figuur 5: Kansdichtheidsfunctie voor de weerstand van een gebouw, aangeduid met R (zie voetnoten 8 en 11 tot en met 13) en van de grootte van de topwaarde van de trillingssnelheid, aangeduid met S (volgens de modellen genoemd in voetnoten 1 tot en met 5).

De kans op schade kan worden bepaald uit de convolutie van de kansverdeling van de weerstand of kwetsbaarheid R van het gebouw met de kansdichtheid van de trillingsbelasting S. De kans op schade $P(R < S)$ volgt rekenkundig uit de convolutie-integraal:

$$P(R < S) = \int_0^{\infty} (1 - F_S(x)) \cdot f_R(x) dx$$

Waarin:

$F_S(x)$ is de kansverdeling van de belasting (de trilling) S

$f_R(x)$ is de kansdichtheid van de weerstand (de kwetsbaarheid) van een gebouw R.

De kansdichtheid van de weerstand R van een gebouw wordt in deze berekening als een vast gegeven gehanteerd. Verder geldt dat de spreiding van de kansverdelingsfunctie van de trillingsbelasting S ook een vast gegeven is. Dan kan door het oplossen van bovenstaande vergelijking worden bepaald wat de waarde de parameter μ_S van de kansverdelingsfunctie van de trillingbelasting (S) moet zijn, om juist een schadekans $P(R < S) = 1\%$ te realiseren. Deze berekening met behulp van een convolutie-integraal komt er op neer dat denkbeeldig de rode curve S in bovenstaande figuur op basis van de parameter μ_S zodanig naar links of naar rechts wordt verschoven, dat de overlap tussen de rode curve S en blauwe curve R precies een kans van 1% heeft. Met deze uitgangspunten volgt dan de gezochte waarde van de parameter μ_S van de trillingsbelasting S. De resultaten van deze berekeningen voor de drie varianten van de weerstand (kwetsbaarheid) van gebouwen zijn vermeld in tabel 1.

Tabel 1: Overzicht van trillingswaarden overeenkomend met een kans op schade van 1% bij verschillende modellen voor de weerstand van gebouwen

Model	Mediane grenswaarde (mm/s)	Overschrijdingskans bij 3 mm/s
TU Delft/Waarts	2,12	28%
Indicaties SBR	1,72	18%
Crowley et al (< 1945)	2,23	31%

We kunnen op basis van de verkregen resultaten bijvoorbeeld zeggen dat een kans op schade van 1 % optreedt bij een zekere mediane waarde van de trillingsbelasting van e^{μ} . Het is echter gebruikelijker om de trillingsbelasting, waarbij de kans op schade van 1 % optreedt, toch te relateren aan de grenswaarden die zijn gegeven in SBR Trillingsrichtlijn A. Indien we 3 mm/s hanteren als criterium, dan kan met de vastgestelde waarden van μ_5 voor de drie varianten worden bepaald wat de bijbehorende overschrijdingskans van de grenswaarde uit de SBR Trillingsrichtlijn A is. Ook deze resultaten zijn vermeld in tabel 1.

Gebaseerd op een berekening met het model TU Delft/Waarts in combinatie met Bommer 2019 zal de overschrijdingskans van 28 % voor de trillingen moeten worden gehanteerd om te komen tot een kans op schade aan een gebouw van precies 1 %. Deze overschrijdingskans wordt ook wel aangeduid als P82. Het hanteren van het model van Cowley, dat is gebaseerd op praktijkwaarnemingen van schade bij de beving in Huizinge, leidt tot een te hanteren overschrijdingskans van 31 % (dus: P69). De indicaties die in de SBR Trillingsrichtlijn A worden gegeven, leiden tot 18 % en dus een P82.

Gebruik van deze resultaten

Het blijkt dus dat – afhankelijk van de gehanteerde modelmatige beschrijving van de weerstand of kwetsbaarheid van een gebouw (R) - bij het model Bommer 2019 voor de sterkte van de trilling (S) een overschrijdingskans tussen 31 % en 18 % moet worden gehanteerd bij de door SBR gegeven grenswaarde, om te voldoen aan de eis dat de kans op schade aan een individueel gebouw ten hoogste 1 % is. De verschillen in te hanteren overschrijdingskans ontstaan dus door de verschillen tussen de varianten voor de beschrijving van de weerstand van het gebouw R. Deze verschillen reflecteren ook de onzekerheid die er tussen deze varianten voor de weerstand of kwetsbaarheid van gebouwen nog is. Het is niet duidelijk welk van de drie varianten de beste is.

Gegeven deze verschillen, is in het TU Delft onderzoek naar schade aan gebouwen in Groningen¹⁴ daarom een iets behoudender waarde dan het gemiddelde van deze drie varianten aangehouden, namelijk een overschrijdingskans van 25 %. Deze waarde wordt ook wel aangeduid als P75. Het hanteren van deze P75 voor de sterkte van de trillingen bij het model Bommer 2019 leidt daarmee bij gebruik van de grenswaarden uit de SBR Trillingsrichtlijn A tot een schadekans aan een individueel gebouw van ongeveer 1 %. De P75-waarde wordt ook door IMG gehanteerd bij de inschatting van de kans op schade aan gebouwen.

Het IMG past op deze methodiek nog systematisch een algemene reductiefactor van 1,5 toe, zoals tabel 2 laat zien.

Tabel 2: Overzicht van trillingscriteria zoals door IMG gehanteerd¹⁵

		Zonder veiligheidsafslag		Na veiligheidsafslag	
		Normaal	Gevoelig	Normaal	Gevoelig
25%	Metselwerk e.a.	5	3	3,3	2
25%	Gewapend beton / hout	20	11,8	13,3	7,8
1%	Metselwerk e.a.	13	7,8	8,5	5
1%	Gewapend beton / hout	52	30	34	20

Het IMG doet dit naar eigen zeggen om te werken met voldoende veilige grenswaarden voor een schadekans van 1%. Dit doet het IMG dus, ongeacht of voor het toepassen van een dergelijke

¹⁴ TU Delft rapport CM-2018-01 Onderzoek naar de oorzaken van bouwkundige schade in Groningen - Methodologie en case studies ter duiding van de oorzaken, oorspronkelijk gepubliceerd juli 2018, revisie versie mei 2019 TU Delft.

¹⁵ Bron: Praktische uitwerking TwG, Instituut Mijnbouwschade Groningen, p. 16.

reductiefactor concreet aanleiding bestaat, bijvoorbeeld omdat sprake zou zijn van herhaald kortdurende trillingen. In de praktijk zal, met name op afstand van het epicentrum van de beving Huizinge (2012), echter vrijwel nooit sprake zijn van herhaald kortdurende trillingen. Als de trillingen niet herhaald kortdurend zijn, maar slechts kortdurend, houdt het consequent toepassen van deze lagere grenswaarden een aanzienlijke reductie in van de kans op schade, van ten hoogste 1 % naar ten hoogste 0,15 %.

Deze praktijk van IMG betekent dat in veel gevallen de feitelijke kans op schade aan gebouwen bij toepassing van de grenswaarden van IMG veel kleiner is dan de beoogde waarde van ten hoogste 1 %.

Conclusie

In deze notitie is toegelicht op welke wijze de kans op schade aan gebouwen moet worden berekend, in geval de sterkte van de opgetreden trillingen niet door meting kon worden bepaald maar slechts op basis van modellen (zoals Bommer 2019) kan worden beschreven. Toegelicht is dat – afhankelijk van de gehanteerde variant voor de kwetsbaarheid van een gebouw – hiervoor een trillingswaarde van het model van Bommer 2019 met een overschrijdingskans tussen 18 % en 31 % moet worden gehanteerd. Indien op basis van de uitkomsten van deze drie varianten een waarde van de overschrijdingskans van 25 % gehanteerd (de zgn. P75), dat is iets behoudender dan het gemiddelde van de drie varianten, wordt bij toepassing van de grenswaarden uit de SBR Trillingsrichtlijn A een kans op schade aan een gebouw verkregen van ongeveer 1 %. Het gebruik van een aanvullende reductiefactor van 1,5 op de SBR-grenswaarden levert – tenzij daar concreet aanleiding toe zou bestaan - een lagere schadekans op, in de orde van 0,15 %.