

Notitie

Aan

Staatstoezicht op de Mijnen

Van

Dr. ir. C.P.W. Geurts
Prof. dr. ir. R.D.J.M. Steenbergen

Onderwerp

Relatie tussen PGA waarden en kans op schade voor geïnduceerde aardbevingen in Groningen

In deze notitie wordt op basis van TNO rapporten en gegevens uit de literatuur een eerste aanzet gedaan tot het leggen van een relatie tussen waarden voor de piekgrondversnelling en een bepaald niveau van schade ten gevolge van aardbevingen. De beschikbare bronnen uit de literatuur en TNO rapporten uit het verleden worden samengevat. Aanleiding voor de notitie is de vraag van SodM [7] om advies te geven over PGA-waarden waarbij er een zekere kans is op het optreden van DS1, DS2, of DS3 schade alsmede de vraag te adviseren over de te accepteren kans op dergelijke niveaus van schade.

In deze notitie wordt in hoofdstuk 1 een overzicht gegeven van de normen en richtlijnen in Nederland op gebied van aardbevingen en schade. Hoofdstuk 2 geeft een samenvatting van TNO rapporten uit het verleden waarin een relatie wordt gelegd tussen bevingen en schade. In hoofdstuk 3 wordt getracht een eerste voorlopige relatie gelegd tussen PGA en de kans op DS1 schade. Hoofdstuk 4 bespreekt de Arup fragility functies uit 2013 voor DS1-5. In hoofdstuk 5 wordt een eerste aanzet gedaan voor een beoordeling met een kans op een bepaald schadeniveau.

1. Normen en richtlijnen in Nederland

1.1 NPR 9998

De Nederlandse Praktijk Richtlijn NPR 9998 is geschreven om te toetsen of een gebouw voldoende veilig is onder aardbevingsbelasting ten gevolge van de gaswinning in Groningen. Deze NPR gaat niet in op het ontstaan van schade, al dan niet constructief, die geen direct gevaar voor instorting oplevert. NPR 9998 focust op menselijke veiligheid en richt zich daarom hoofdzakelijk op de bezwijkgrenstoestand (welke overeenkomt met de grenstoestand DS5).

Technical Sciences

Van Mourik Broekmanweg 6
2628 XE Delft
Postbus 49
2600 AA Delft

www.tno.nl

T +31 88 866 30 00

Datum

13 juni 2016

Onze referentie

M0100296951

E-mail

raphael.steenbergen@tno.nl

Doorkiesnummer

+31 88 866 34 23

1.2 SBR Richtlijn A

In Nederland wordt doorgaans SBR Richtlijn A gebruikt om te beoordelen of een trilling acceptabel is met betrekking tot het optreden van schade aan gebouwen. Hoewel dit niet expliciet is benoemd in de richtlijn, zijn de grenswaarden gekoppeld aan het initiëren van een scheur in een constructieonderdeel (beton, metselwerk). Dit initiëren van scheuren is te vergelijken met een DS1 schadetoestand. SBR Richtlijn A gebruikt de topwaarde van de trillingssnelheid op funderingsniveau als maat voor de beoordeling.

SBR Richtlijn A is bedoeld als meet- en beoordelingsrichtlijn tijdens het optreden van trillingen. Zodra een grenswaarde voor de trillingssnelheid wordt overschreden, wordt doorgaans een ingreep gepleegd om ervoor te zorgen dat dit niet meer voorkomt.

In het kader van de ontwikkeling van de SBR Richtlijn A heeft TNO in het verleden een relatie afgeleid tussen de optredende trillingsniveaus, gemeten op de fundering, en de kans op het optreden van schade (Waarts, 1997). Opgemerkt wordt dat voor deze door TNO afgeleide relatie is uitgegaan van gesimplificeerde relaties tussen trillingsniveaus en spanningen in het materiaal, en van een eenvoudig model van een constructie. Verder is gebruik gemaakt van numerieke simulaties. Er is in dit kader geen gebruik gemaakt van meetgegevens. Er wordt momenteel in het kader van de herziening van de SBR Richtlijn gewerkt aan de ontwikkeling van schadecurves, wat zou kunnen leiden tot een update van de door TNO afgeleide relatie.

De zogenoemde S-curves zijn het equivalent van de Fragility Curves welke in het kader van aardbevingen zijn gemaakt. Binnen de SBR commissie is nog discussie gaande in hoeverre de belasting door aardbevingen onderdeel zijn van de beoordeling volgens SBR Richtlijn A (diverse trillingsbronnen zijn genoemd, aardbevingen niet), maar vooralsnog is er volgens TNO geen reden om aan te nemen dat de gevolgen van aardbevingen niet conform de SBR Richtlijn A kunnen worden beoordeeld.

Datum

13 juni 2016

Onze referentie

M0100296951

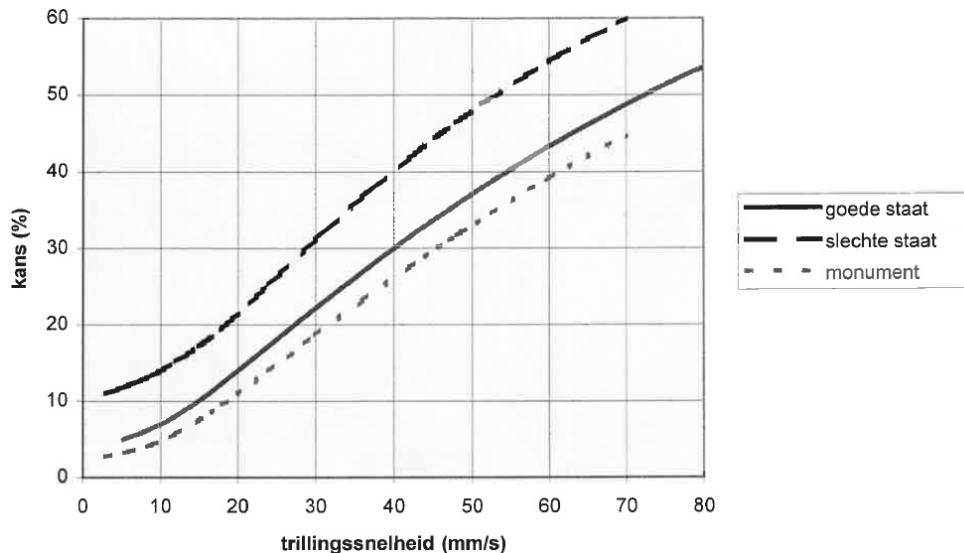
Blad

2/19

Datum
13 juni 2016

Onze referentie
M0100296951

Blad
3/19



Figuur 1: Kans op schade als gevolg van trillingen (volgens Waarts, 1997).

De grenswaarden in de SBR Richtlijn A zijn afhankelijk van de staat van de constructie en van de frequenties van het trillingssignaal. Deze grenswaarden liggen bij 3 of 5 mm/s voor metselwerk in slechte, respectievelijk goede staat bij dominante frequenties tot 10 Hz. De kans op schade, die hoort bij de grenswaarde uit SBR Richtlijn A, is niet expliciet benoemd in de richtlijn. Uit Figuur 1 kan worden afgeleid dat deze kans in de orde van 1 tot 10 % is afhankelijk van de staat of aard van het gebouw. Deze kans is gekoppeld aan het optreden van een trillingsniveau ten tijde van het aanwezig zijn van een trillingsbron, en dit niveau kan meerdere malen tijdens de levensduur van de constructie optreden.

Opvallend in de curves in SBR Richtlijn A is dat deze een ondergrenswaarde hebben die groter is dan 0. In de berekeningen die aan deze curves ten grondslag hebben gelegen is een 'autonome kans op schade' aanwezig als gevolg van initiële spanningen in het materiaal.

1.3 Discussie

In de huidige richtlijnen wordt enerzijds getoetst op instorting (DS5), en anderzijds op het begin van schade als gevolg van trillingen (DS1). Er is geen richtlijn of norm die ingaat op tussenliggende schadetoestanden (DS 2, DS3 en DS 4) en er zijn daarvoor derhalve geen expliciete keuzes bekend ten aanzien van de schade die wordt geaccepteerd.

De SBR richtlijn A gaat uit van gemeten piek-trillingssnelheden v_{top} op de fundering. De aardbevingsbelasting wordt gegeven in PGA waarden op maaiveldniveau. In het vervolg van deze notitie wordt getracht een relatie te leggen tussen deze twee grootheden.

2. Relatie bevingen en schade, TNO rapporten uit het verleden.

In dit hoofdstuk wordt een aantal TNO studies uit het verleden aangehaald die betrekking hebben op dit onderwerp.

Rapport 1

“Relatie tussen schade aan gebouwen en lichte, ondiepe aardbevingen in Nederland: Inventarisatie, TNO rapport 97-CON-DYN-R1523-1”

In 1997 heeft TNO relaties bepaald tussen de kans op bouwkundige schade en verschillende aardbevingsmaten, waaronder PGA. Deze relaties zijn opgesteld op basis van de kennis (rekenmodellen) die destijds beschikbaar was en zijn afgeleid uit gegevens m.b.t. aardbevingen in het Roswinkel veld. Hierbij vormden de schaderelaties uit de SBR Richtlijn de basis. Deze relaties hebben dus in feite betrekking op DS1. Voor de relatie tussen bodemversnelling en snelheid op de fundering zijn overdrachtsverhoudingen gebruikt. Voor de frequentie is uitgegaan van 10 Hz (met een spreiding van 3Hz in een uniforme verdeling), wat was gebaseerd op analyse van aardbevingssignalen die destijds beschikbaar waren.

Datum

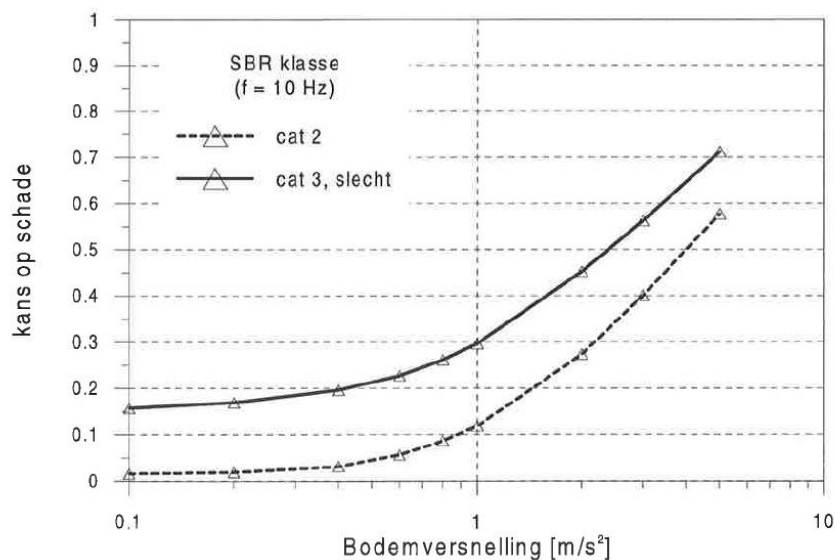
13 juni 2016

Onze referentie

M0100296951

Blad

4/19



*Figuur 2: Relatie tussen PGA en kans op schade
(uit TNO Rapport 97-CON-DYN-R1523)*

Bovenstaande figuur komt uit het genoemde TNO rapport en geeft een eerste indicatie hoe de schadekans wordt beïnvloed door de bodemversnelling (PGA). Voor de lagere niveaus van bodemversnelling wordt een ‘autonome’ kans op schade gevonden die gedomineerd wordt door de onzekerheid over de initiële spanningen in het materiaal. Boven deze waarde is de invloed van de aardbeving merkbaar in de schadekans. Geconcludeerd is toen dat boven een bodemversnelling van $0,5 \text{ m/s}^2$ ($0,05g$) de invloed van de aardbevingen op de kans op schade duidelijk merkbaar is.

Bij 'slechte staat' speelt ook de aanwezigheid van bestaande scheuren (eventueel ontstaan door eerdere bevingen) een rol. Al bij een lage aardbevingsbelasting is sprake van een verergering daarvan.

Inmiddels zijn de inzichten en modellen voor het beschrijven van de aardbevingsbelasting doorontwikkeld. Figuur 2 moet derhalve worden gezien als een indicatie. Nagegaan moet worden in hoeverre dit van toepassing is op de problematiek in Groningen, gegeven de kennis die thans beschikbaar is.

Rapport 2

“Kalibratiestudie schade door aardbevingen (TNO-034-DTM-2009-04435)”

Dit rapport, dat door NAM is aangehaald in het technisch achtergrondrapport bij het Winningsplan April 2016, bestudeert vijf waargenomen aardbevingen in Noord Nederland en relateert deze aan toegekende schadeclaims per aardbeving. Uit het rapport:

“De verwachtingswaarde voor de trillingsnelheid op een bepaalde afstand van het epicentrum aan maaiveld voor de 5 cases wordt verkregen uit de attenuation relatie van het KNMI. De attenuation curve is berekend op basis van de attenuation relatie van het KNMI voor Noord-Nederland, gebaseerd op accelerometerdata en boorgatseismometerdata (Dost, pers. comm., 2007). De attenuation relatie is als volgt geformuleerd:

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

met:

- R = afstand tot epicentrum (m),
- d = diepte(m) hypocentrum,
- M = magnitude,
- V_h = peak ground velocity of pgv (cm/s) en
- OS = opslingerfactor (-) voor de ondergrond.

In het rapport zijn voor de vijf aardbevingen de waarden van bovengenoemde parameters gegeven. De gekozen haarddieptes en opslingerfactoren, gebruikt in de berekeningen van de snelheden aan maaiveld, geven de beste fit op de accelerometerdata voor de betreffende bevingen.”

Dit levert een kaart met isocontouren van 'snelheidsniveau's, welke is gebruikt om percentages schade vast te stellen (aantal gebouwen met toegekende schadeclaims gedeeld door het totale aantal gebouwen, gegeven een bepaalde PGA waarde). Er zijn voor deze relaties geen trillingsmetingen aan de gebouwen beschikbaar. Ook is niet bekend of het hier alleen lichte schade (DS1) betreft of ook grotere schade (DS2) en in welke hoeveelheid.

Datum

13 juni 2016

Onze referentie

M0100296951

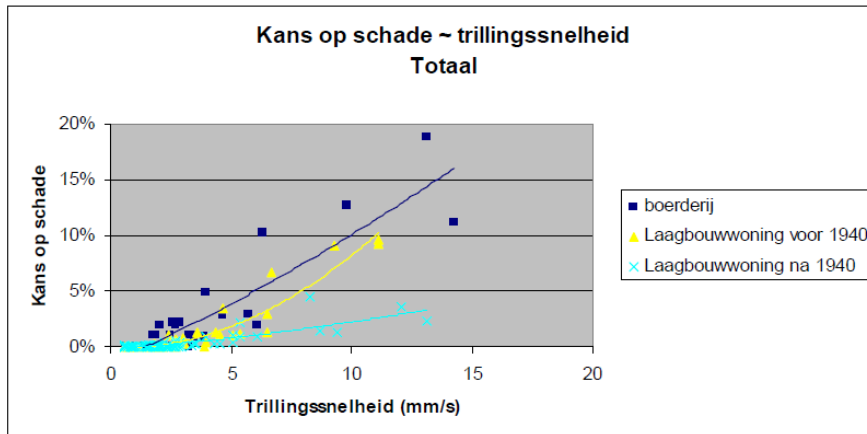
Blad

5/19

Datum
13 juni 2016

Onze referentie
M0100296951

Blad
6/19



Figuur 15 Kans op schade bij een bepaalde trillingssnelheid op basis van gegevens uit de aardbevingen Roswinkel 1997 en 1998, Hoeksmeer, Stedum en Westereinden ~ waarbij de categorie boerderijen niet is onderverdeeld naar bouwjaar

Figuur 3: Kans op schade versus trillingssnelheid (TNO rapport TNO-034-DTM-2009-04435), kalibratie op basis van schadeclaims en een trillingssnelheid o.b.v. een per aardbeving best fit attenuation curve.

Op basis van Figuur 3 kan een inschatting gemaakt worden van de trillingsniveaus die horen bij een bepaalde kans op schade. Uit Figuur 3 (figuur 15 uit het TNO rapport) kan de trillingssnelheid bij 1% kans op schade voor boerderijen, laagbouwwoningen voor 1940 en laagbouwwoningen na 1940 worden afgelezen. In de volgende tabel (afkomstig uit het TNO rapport) zijn de grenswaarden uit de SBR Richtlijn vergeleken met de trillingssnelheden die volgen uit Figuur 3.

Tabel 1: De buitengrens per woningcategorie per aardbevingscase bij 1% kans op schade

Categorie	Trillingssnelheid bij 1% kans op schade (Figuur 3) (mm/s)	SBR categorie	Grenswaarde SBR (mm/s)
Boerderij	2,4	3	3
Laagbouwwoning voor 1940	3,3	2	5
Laagbouwwoning na 1940	5,8	2	5

Uit deze tabel volgt dat de trillingssnelheden uit figuur 3, behorende bij 1% kans op schade, grofweg vergeleken kunnen worden met de grenswaarden uit de SBR richtlijn voor categorie 2 en 3. Op basis van deze studie wordt in het TNO rapport geconcludeerd dat er een goede overeenkomst is tussen de uitgangspunten van de SBR Richtlijn A en de waarnemingen van schades (in de vorm van toegekende schadeclaims) bij aardbevingen in Groningen. De piekwaarde van de trillingssnelheid is daarbij een goede maat voor de beoordeling van de trillingsniveaus.

3. Relatie tussen PGA en DS1 schade in Groningen

In deze paragraaf wordt in de gevonden relaties uit SBR Richtlijn A en uit Figuur 3 de pieksnelheid op de horizontale as omgerekend naar PGA. Hierbij is aangenomen dat de piekversnelling op funderingsniveau overeenkomt met de piekgrondversnelling (PGA).

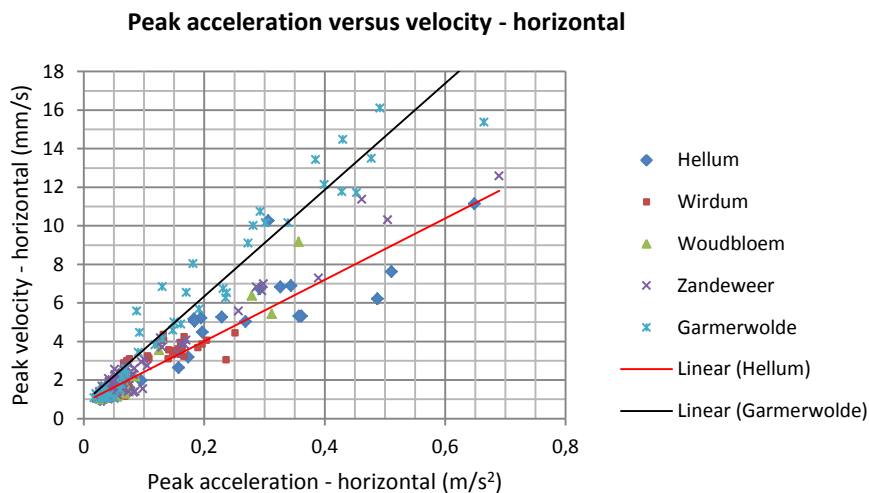
3.1 Relatie pieksnelheid en piekversnelling

Er wordt gerekend met een relatie tussen PGA en PGV zoals deze waargenomen is in het TNO-NAM meetnet voor de aardbevingen. Voor vijf aardbevingen is deze relatie weergegeven in Figuur 4 voor de horizontale componenten en in Figuur 5 voor de verticale componenten.

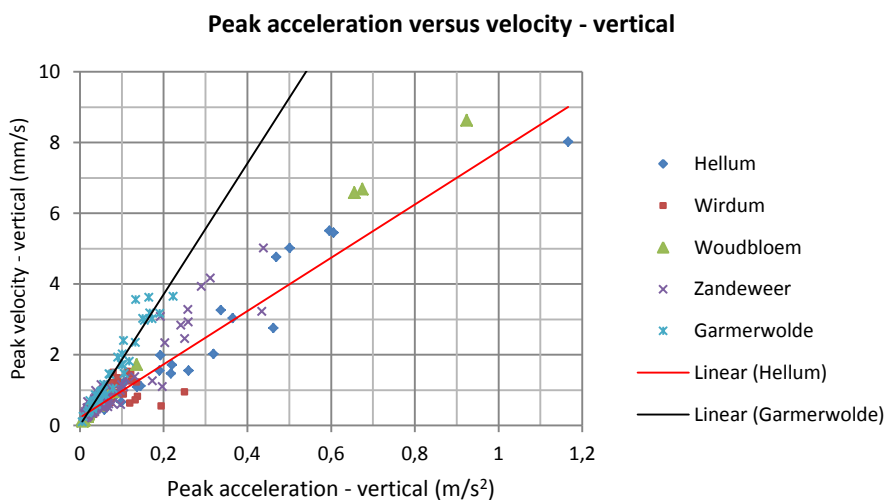
Datum
13 juni 2016

Onze referentie
M0100296951

Blad
7/19



Figuur 4: Pieksnelheid versus piekversnelling op basis van waarnemingen uit het NAM-TNO meetnet voor 5 aardbevingen, horizontaal.



Figuur 5: Pieksnelheid versus piekversnelling op basis van waarnemingen uit het NAM-TNO meetnet voor 5 aardbevingen, verticaal.

Datum
13 juni 2016

Onze referentie
M0100296951

Blad
8/19

Uit bovenstaande grafieken blijkt dat er per aardbeving een bij benadering lineaire relatie bestaat tussen pieksnelheid en piekversnelling; deze relatie kan verschillen van beving tot beving en is anders voor de verticale dan voor de horizontale component. Dit komt doordat het trillingspectrum van beving tot beving verschilt.

De relatie tussen PGA en PGV kan als een stochast gezien worden. Deze zou als zodanig moeten worden meegenomen bij het bepalen van de kans op schade. Vanwege de beperkt beschikbare tijd wordt dit nu niet gedaan; het verdient aanbeveling dit wel te doen.

Uit de Figuren 4 en 5 volgt dat voor de gemeten beperkte set aan bevingen de aardbevingen Garmerwolde en Hellum als uitersten gezien kunnen worden.

Dit levert de volgende relaties:

Garmerwolde:

Horizontaal: $PGA = 0.036\hat{v} - 0.03$ met PGA in m/s^2 en \hat{v} in mm/s

Verticaal: $PGA = 0.054\hat{v}$ met PGA in m/s^2 en \hat{v} in mm/s

Hellum:

Horizontaal: $PGA = 0.063\hat{v} - 0.053$ met PGA in m/s^2 en \hat{v} in mm/s.

Verticaal: $PGA = 0.13\hat{v} - 0.03$ met PGA in m/s^2 en \hat{v} in mm/s.

Schade kan veroorzaakt worden door zowel de horizontale als de verticale component; welke precies de bijdrage van de verticale en horizontale component bedraagt voor de huidige situatie in Groningen is onbekend en dient nader onderzocht te worden.

3.2 Relatie tussen PGA en DS1 schade

Bovenstaande constatering met betrekking tot de grote invloed van de frequentie-inhoud van de bevingen en met betrekking tot de invloed horizontaal-verticaal op de relatie tussen pieksnelheden en piekversnellingen maakt dat de relatie tussen pieksnelheden en piekversnellingen en de daaraan gerelateerde schade moeilijk vast te stellen is. Uit Figuur 4 en 5 blijkt een enorme spreiding ook rondom de gefitte lineaire relaties. Soms is ook bij zeer lage PGA-waarden een kleine kans op schade (zie onderstaande tabel). Het verdient aanbeveling dit nader te onderzoeken in een probabilistische benaderingswijze.

Bovenstaande relaties leveren de volgende ranges van PGA waarden behorend bij de grenswaarden uit SBR-A.

Grenswaarde uit SBR-A (geaccepteerde kans op DS1 schade)	PGA
3 mm/s (slecht metselwerk)	0,008-0,036 g
5 mm/s (goed metselwerk)	0,015-0.062 g

Datum
13 juni 2016

Onze referentie
M0100296951

Blad
9/19

Hieruit volgt dat, indien SBR A wordt gevolgd en als ondergrens wordt aangehouden, een PGA waarde van gemiddeld 0,03 g bij goed metselwerk als grenswaarde volgt. Bij gebouwen uit slecht metselwerk (in de TNO analyse betrokken op boerderijen) komt dit overeen met gemiddeld 0,02 g. Uit Figuur 3 volgt voor trillingssnelheden waarbij 10% kans op schade optreedt voor slecht metselwerk bij benadering ongeveer 6 mm/s. Dit komt overeen met de onderstaande PGA waarde:

10% kans op DS1 schade	PGA
6 mm/s (slecht metselwerk)	0,019-0,075 g

In figuur 9.6 uit het Technical Addendum bij het NAM Winningsplan April 2016 is het percentage gebouwen met claims uitgezet tegen de PGA die uit de GMPE is bepaald, voor de aardbeving bij Huizinge. Niet bekend is welke van die claims zijn toegekend. In Figuur 6 wordt 10% (met een grote spreiding) gebouwen met schadeclaims gevonden bij een PGA van ongeveer 0.025g hetgeen ongeveer in lijn is met de hiervoor omschreven observatie (0.02-0.03g) vanuit de TNO kalibratiestudie.

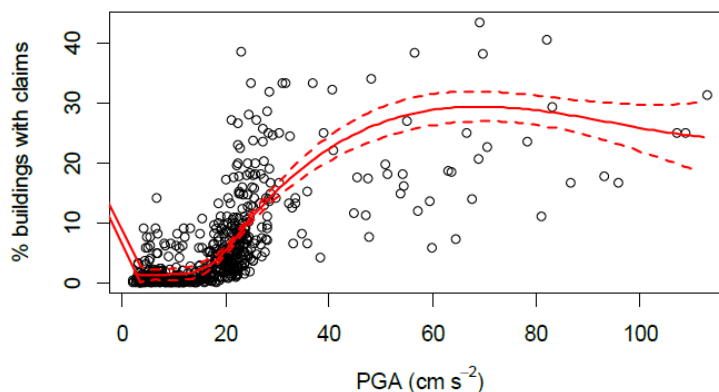


Figure 9.6 Percentage of claims for building exposed to the ground acceleration for the Huizinge earthquake of August 2012.

Figuur 6: Relatie tussen PGA en de schadeclaims op basis van de Huizinge aardbeving (opgemerkt wordt dat de grafiek bij $PGA = 0 \text{ cm/s}^2$ en bij $PGA > 60 \text{ cm/s}^2$ een onrealistisch verloop heeft)

Samengevat is het niet onredelijk op dit moment uit te gaan van Figuur 3 temeer dat dit een relatie is op basis van de *toegekende* schadeclaims. In onderstaande tabel wordt samengevat voor kansen op schade van 1% en 5% alsmede voor 20% in geval van een boerderij welke de bijbehorende trillingssnelheid en PGA waarde is. Dit op basis van Figuur 3 en de hierboven gegeven relaties tussen pieksnelheid en piekversnelling. Opgemerkt wordt dat er niet geëxtrapoleerd wordt naar grotere overschrijdingskansen dan die waargenomen in Figuur 3.

Datum
13 juni 2016

Onze referentie
M0100296951

Blad
10/19

Tabel 2: Trillingssnelheid waarbij de kans op schade gelijk is aan 1%, 5% en 20%

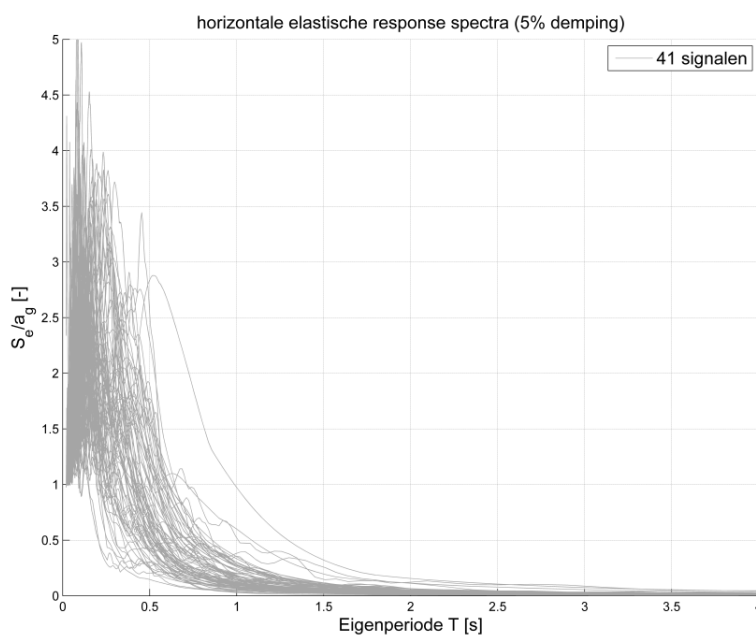
Categorie	Overschrijdingskans 1% [mm/s]	Overschrijdingskans 5% [mm/s]	Overschrijdingskans 20% [mm/s]
Boerderij	2,4	6	17
Laagbouwwoning voor 1940	3,3	8	
Laagbouwwoning na 1940	5,8	18	

Tabel 3: PGA waarde waarbij de kans op schade gelijk is aan 1%, 5% en 20%

Categorie	Overschrijdingskans		
	1% [g]	5% [g]	20% [g]
Boerderij	0,006-0,028	0,019-0,075	0,058-0,22
Laagbouwwoning voor 1940	0,009-0,04	0,026-0,1	
Laagbouwwoning na 1940	0,018-0,074	0,06-0,23	

3.3 Nadere beschouwing spreiding in de relatie pieksnelheid-piekversnelling

De grote spreiding in de relatie tussen pieksnelheid en piekversnelling wordt geïllustreerd in Figuur 7; hier is het responspectrum weergegeven voor 41 door het KNMI gemeten horizontale versnellingssignalen uit de periode 2006 – 2013. De dominante frequentie in het spectrum verschilt van beving tot beving en van locatie tot locatie.



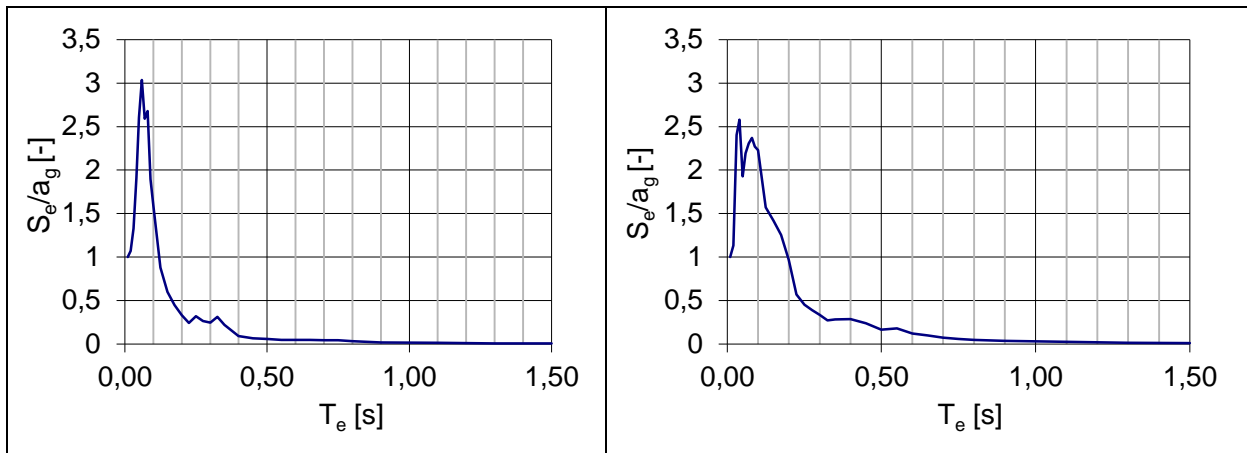
Figuur 7: Responspectrum bepaald voor 41 door het KNMI gemeten horizontale versnellingssignalen uit de periode 2006 – 2013

Hetzelfde wordt geïllustreerd door middel van Figuur 8. Hier is voor de Huizinge beving het verticale responspectrum weergegeven voor 2 meetlocaties: Westeremden en Middelstum. Voor dezelfde beving is de dominante frequentie verschillend per meetlocatie.

Datum
13 juni 2016

Onze referentie
M0100296951

Blad
11/19



Figuur 8: Verticale spectra Huizinge beving voor de locaties Westeremden (links) en Middelstum (rechts).

Dit maakt dat de relatie tussen piekversnelling en pieksnelheid bij voorkeur probabilistisch in rekening gebracht moet worden. Ook dienen daar waar mogelijk afhankelijkheden van de lokale bodemopbouw onderzocht en meegenomen te worden.

3.4 Trillingsniveau's verkeer

In TNO rapport B 90-822 (1991) is uit een inventarisatie van een groot aantal metingen aangetoond dat voor dagelijks verkeer de trillingsniveaus onder de 2 mm/s blijven. Dit ligt dus onder de grenzen in Tabel 2.

4. Relatie tussen DS1, DS2 en DS3 schade op basis van ARUP-Fragility Functions

Datum
13 juni 2016

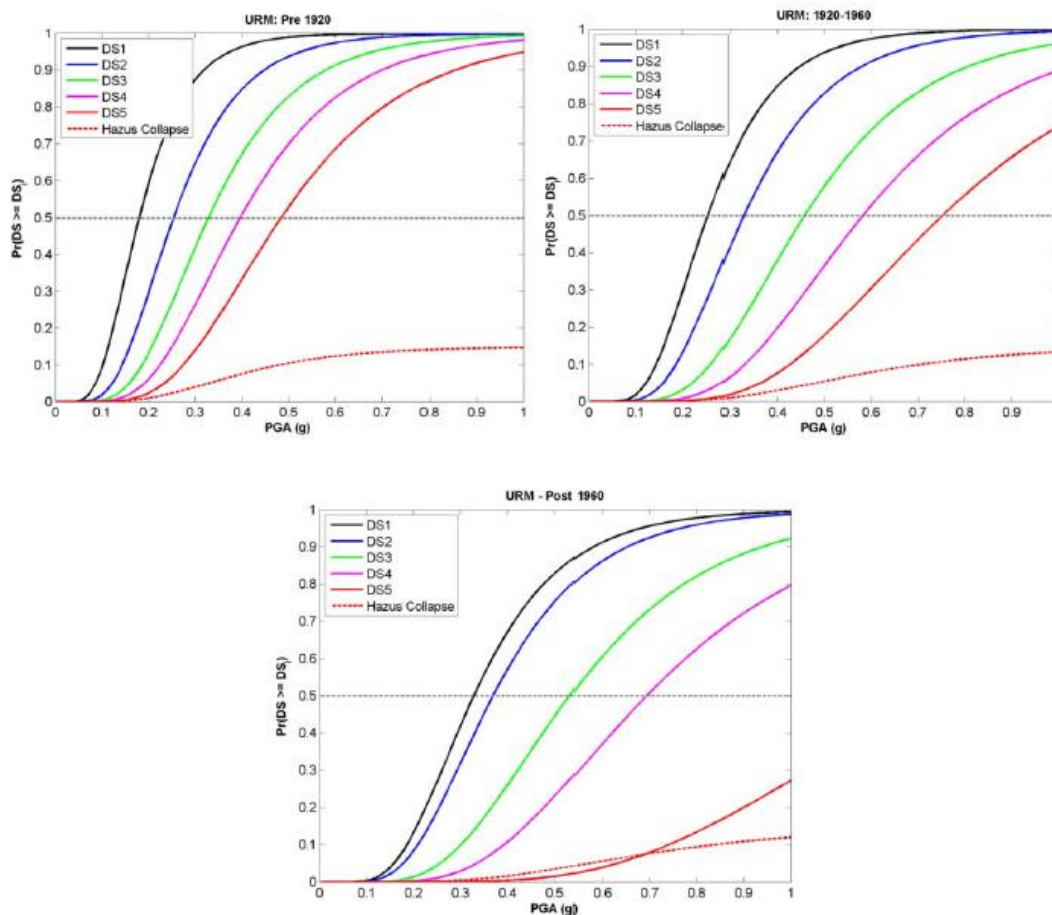
Onze referentie
M0100296951

Blad
12/19

Door Arup [1] zijn in 2013 fragility functies afgeleid voor de vijf schadetoestanden DS1 tot en met DS5. Deze geven de relatie weer tussen een optredende PGA en de kans dat een bepaalde schadetoestand wordt bereikt. Deze fragility functions worden hieronder besproken.

4.1 Arup (2013) fragility functions

Deze zijn voor ongewapend metselwerk overgenomen in de grafieken in Figuur 9.



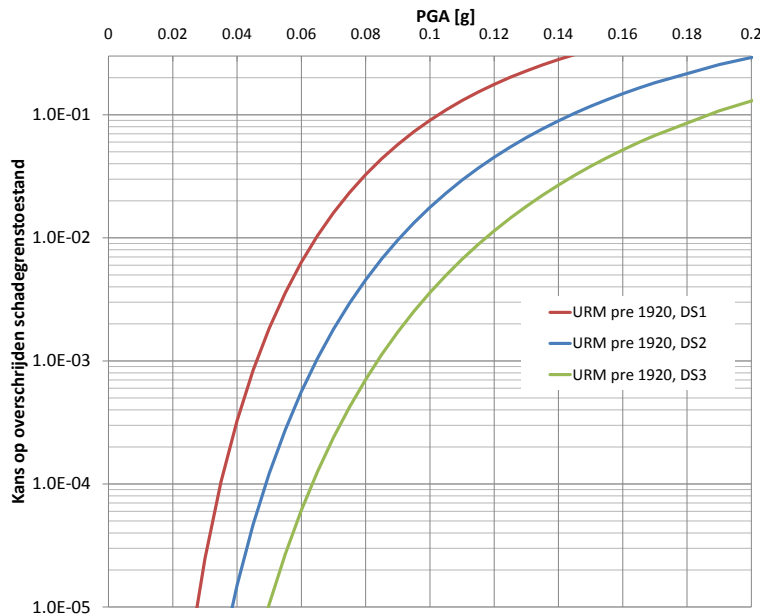
Figuur 9: ARUP (2013) Fragility curves

Voor het bouwtype “URM pre 1920” (metselwerk voor 1920) worden de hoogste kansen op overschrijden van de betreffende grenstoestand gevonden, gegeven een PGA waarde. Zie Figuur 10 voor een uitsnede van de grafiek bij een kans < 10%.

Datum
13 juni 2016

Onze referentie
M0100296951

Blad
13/19



Figuur 10: Kans op overschrijden van een schade-toestand als functie van de piek-grondversnelling, voor kansen kleiner dan 10%

Uit deze curves volgen de PGA waarden bij een gegeven kans op overschrijden zoals weergegeven in tabel 4. Deze kans op overschrijden is gegeven het optreden van de PGA (ofwel gegeven het aanwezig zijn van een trillingsbron), en is niet gerelateerd aan een (ontwerp-)levensduur. Er wordt dus geen rekening met het vaker voor (kunnen) komen van deze trillingsniveaus.

Tabel 4: Kansen op overschrijding DS1-3 en PGA waarden, Arup (2013)

Kans op overschrijding	PGA (in g)		
	DS1	DS2	DS3
3 %	0,079	0,111	0,143
1 % = 10^{-2}	0,065	0,091	0,118
0,5 %	0,058	0,081	0,105
0,1 % = 10^{-3}	0,046	0,068	0,084
1/10000 = 10^{-4}	0,035	0,049	0,063

De PGA van 0,065g (met kans van 10^{-2} op DS1 schade), komt voor DS2 en DS3 respectievelijk overeen met een kans van ongeveer $1 \cdot 10^{-3}$ en $1 \cdot 10^{-4}$ (gemarkeerde cellen in tabel 4). Met andere woorden, bij kleine kansen neemt de overschrijdingskans met een factor 10 af van DS1 naar DS2 en van DS 2 naar DS3.

Vanuit dezelfde fragility curves kan voor een gegeven PGA de kans op overschrijding van de betreffende schadetoestand worden berekend; zie Tabel 5.

Datum
13 juni 2016

Onze referentie
M0100296951

Blad
14/19

Tabel 5: PGA waarden en kansen op overschrijding DS1-3, Arup (2013)

PGA (in g)	Kans op overschrijding schadetoestand		
	DS1	DS2	DS3
0,04	$3,3 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$9,8 \cdot 10^{-7}$
0,06	$6,3 \cdot 10^{-3}$	$5,6 \cdot 10^{-4}$	$6,1 \cdot 10^{-5}$
0,08	$3,3 \cdot 10^{-2}$	$4,6 \cdot 10^{-3}$	$7,1 \cdot 10^{-4}$
0,10	$9,0 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$3,6 \cdot 10^{-3}$
0,12	0,18	$4,5 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$

Deze waarden zijn afgeleid voor ongewapend metselwerk (URM) van voor 1920, welke in de gebruikte classificatie het meeste gevoelige constructietype is. De kansen op schade bij andere constructietypen liggen derhalve lager dan hier genoemd.

4.2 Discussie

De kansen op schade die volgen uit de SBR Richtlijn A, en de kalibratiestudie van TNO (zie paragraaf 2), wijken voor kleine kwantielen sterk af van de kansen die volgen uit de DS1 curves zoals hierboven omschreven. Bij gelijke PGA van ongeveer 0,03 g is de bijbehorende kans op optreden van schade een factor 100 hoger volgens de studies van TNO.

De TNO en ARUP-DS1 curves liggen dicht bij elkaar als we naar de hogere kwantielen kijken. Vergelijk:

Figuur 3: 20% kans op schade bij 20 mm/s ofwel (via Figuur 4) in de range van 0,7 – 1,2 m/s²

Figuur 9: URM <1920: 20% kans op schade bij PGA=0,12 g

De verschillen tussen de Arup DS1 curves en de eerdere kalibratiestudie van TNO zijn te herleiden tot de volgende aspecten:

- Het werk van TNO (en de SBR Richtlijn) is gebaseerd op de Nederlandse situatie (bouwwijze); de Arup DS1 curves zijn gebaseerd op wereldwijde waarnemingen.
- De TNO grafiek uit het kalibratierapport maakt gebruik van modellen voor de attenuation, en toegekende schademeldingen. De attenuation curves kennen een onzekerheid ten opzichte van de werkelijk optredende versnellingen/snelheden.
- De door Arup gegeven DS curves zijn afgeleid van analyses van schade-surveys, welke een grote spreiding laten zien, met name in het gebied waar de kans in de orde van 10% of lager is.
- De curves van TNO zijn met name van belang bij lage trillingniveaus. Voor hogere trillingsniveaus zijn er geen data beschikbaar op basis waarvan deze curves kunnen worden gevalideerd.

Hieronder volgt een korte achtergrond bij de database gebruikt door Arup [2013]:

Global Earthquake Model Empirical Vulnerability Compendium

The Global Earthquake Model (GEM) is an international project to develop and improve methods and tools for seismic risk assessment. They have recently produced a compendium of available empirical vulnerability, fragility and loss functions from the literature, containing 100s of relationships (Rossetto, Ioannou, and Grant, 2012). This is accompanied by a Microsoft Access database of the relationships, with extensive meta-data about their applicability. Examples of the meta-data are: building material and typology, number of storeys, age of buildings, ground motion intensity measure used, regression method and functional form used to fit the empirical data, sources of the data (earthquake events and geographical spread).

Datum

13 juni 2016

Onze referentie

M0100296951

Blad

15/19

Er is geen analyse beschikbaar van DS2 of DS3 schade welke is gerelateerd aan de Groningse situatie. De DS2 en DS3 curves worden, gezien het verschil in waarnemingen tussen de DS1 curves en de TNO studie, momenteel ongeschikt geacht om de basis te vormen voor een regelparameter.

Uit Figuur 9 kan worden afgeleid dat indien er sprake is van ongeveer 10% kans op DS1 schade er sprake is van ongeveer 2% kans op DS2 schade en ongeveer 0.5% kans op DS3 schade. Opgemerkt wordt dat deze verhouding niet geldig is voor de hele PGA-range. Bij 1% kans op DS2 schade hoort ongeveer 5% kans op DS1 schade; bij 1% kans op DS3 schade hoort ongeveer 20% kans op DS1 schade.

Dit lijkt niet onredelijk als eerste voorlopige inschatting voor de situatie in Groningen daar er op dit moment reeds een gering aantal DS2 gevallen en een tiental DS3 gevallen zijn waargenomen (referentie: Winningsplan Groningen Gasveld, April 2016, p. 56).

5. Relatie tussen schade en PGA, aanzet tot een beoordeling.

Er kan langs twee wegen tot een beoordelingscriterium worden gekomen. De eerste betreft een criterium op basis van alleen DS1 schade; de tweede betreft een methode waarbij een relatie wordt aangenomen tussen de kansen op DS1, DS2 en DS3 schade, waarna een criterium kan worden gekozen op basis van DS2 en/of DS3 schade. De eerste methode is op basis van eerdere aardbevingen in Noord Nederland tot op zeker hoogte empirisch onderbouwd in de TNO kalibratiestudie; de tweede methode berust op aannamen die nog geverifieerd dienen te worden en is dus lastig te onderbouwen.

In beide methoden moeten pieksnelheden naar piekversnellingen omgerekend worden. Hier is een aanzienlijke spreiding waargenomen door de grote invloed van het spectrum van de bevingen en de richting (horizontaal-verticaal). Dit maakt dat voor een beoordelingscriterium hier een (voorlopige) keuze gemaakt moet worden; deze dient dan in een vervolgstudie onderbouwd te worden.

In Waarts (1997) wordt bij het bepalen van de kans op schade gewerkt met alleen een verticaal trillingsignaal; dit omdat voor metselwerk deze maatgevend is daar scheuren in metselwerk meestal in de verticale (stoot)voegen ontstaan. Echter dit dient voor aardbevingen nader empirisch onderzocht en onderbouwd te worden.

Daarom wordt voor deze voorlopige aanzet gewerkt met de relatie tussen de verticale componenten van de pieksnelheid en piekversnelling uit Figuur 5. Er is voorlopig voor die beving gekozen die bij dezelfde waarde voor de pieksnelheid de laagste waarden voor de piekversnelling oplevert (Garmerwoldebeving).

Zoals hierboven vermeld gaat SBR Richtlijn A impliciet uit van een grenswaarde voor de kans op DS1 schade tussen 1 en 10%. Een kans op schade van ongeveer 1% bij deze grenswaarde is gevonden bij de analyse van toegekende schade gerelateerd aan aardbevingen. Gezien de curve in Figuur 3 is echter in de praktijk in Groningen sprake van veel grotere kansen op schade reeds bij kleine bevingen gezien de optredende PGA-waarden.

DS2 schade is veel ingrijpender en moeilijker te repareren; DS 3 schade leidt in veel gevallen tot het total loss zijn van bouwwerken. Er kan bijvoorbeeld ervoor worden gekozen om volgens de SBR-A redeneerlijn maximaal een 1% waarde voor de kans op DS2 c.q. DS3 schade acceptabel te laten zijn.

Het is uiteindelijk aan de overheid om bepaalde normen te stellen. Daarom wordt in onderstaande paragrafen volstaan met het geven van indicatieve waarden voor de PGA bij verschillende kansen van optreden van schadegrenstoestanden.

Datum

13 juni 2016

Onze referentie

M0100296951

Blad

16/19

Datum
13 juni 2016

Onze referentie
M0100296951

Blad
17/19

5.1 Methode 1: op basis van DS1 schade

Onderstaande tabel geeft op basis van hoofdstuk 3 een relatie tussen de PGA en de kans op DS1 schade.

Tabel 6: Kansen op DS1 schade en bijbehorende PGA waarden

Kans op DS1 schade	PGA [g]		
	Boerderij	Laagbouwwoning voor 1940	Laagbouwwoning na 1940
20%	0,1		
5%	0,03	0,045	0,1
1%	0,015	0,02	0,03

Opgemerkt wordt dat vanwege de grote variaties deze getallen niet meer dan indicatief zijn.

5.2 Methode 2: DS1-2-3 schade

Onderstaande tabel geeft op basis van voorgaande hoofdstukken een relatie tussen de PGA en de kans op DS1, DS2 en DS3 schade: bij 1% kans op DS2 schade hoort ongeveer 5% kans op DS1 schade; bij 1% kans op DS3 schade hoort ongeveer 20% kans op DS1 schade. Deze aanname is niet geverifieerd en berust slechts op de Arup (2013) fragility curves zoals vermeld in paragraaf 4.

Tabel 7: Kansen op DS1-2-3 schade en bijbehorende PGA waarden

Kans op DS1 schade	Kans op DS2 schade	Kans op DS3 schade	PGA [g]		
			Boerderij	Laagbouwwoning voor 1940	Laagbouwwoning na 1940
20%		1%	0,1		
5%	1%		0,03	0,045	0,1
1%			0,015	0,02	0,03

Dit betreft een voorlopige inschatting. De relatie met PGA waarden zoals hierboven afgeleid leidt tot een betrekkelijk brede range aan waarden.

5.3 Bevindingen

De TNO kalibratiestudie schade door aardbevingen uit 2009 en de TNO studie uit 1997, welke ten grondslag ligt aan SBR Richtlijn A, kunnen behulpzaam zijn bij het vaststellen van een relatie tussen de kans op schade en de pieksnelheids- en piekversnellingsniveau's. Deze relatie kan dienen als technische onderbouwing voor eventuele regelparameters. Om deze relatie nauwkeuriger vast te leggen, dienen de bestaande kalibratiestudies geactualiseerd te worden. Dit op basis van inzichten uit het NAM-TNO meetnet en met aandacht voor de relatie met DS2 en DS3 curves.

Deze notitie is samengesteld op basis van gegevens, welke nu beschikbaar zijn en moet daarom als eerste aanzet gezien worden.

Dankwoord

De NAM heeft toestemming gegeven voor gebruik van geaggregeerde gegevens,
afkomstig uit het Groningen sensormetnet.

Datum

13 juni 2016

Onze referentie

M0100296951

Blad

18/19

Referenties

- [1] Arup: 2013: Groningen 2013 Seismic Risk Study –Earthquake Scenario – based Risk assessment (REP /229746/SR001, 29 november 2013).
- [2] Waarts, 1997: Kans op schade door Trillingen, TNO Rapport 97-CON-DYN-R1698.
- [3] Van Staalduinen, Geurts, 1998: De relatie tussen schade aan gebouwen en lichte, ondiepe aardbevingen in Nederland: inventarisatie, TNO Rapport 97-CON-R1523-1.
- [4] Van Staalduinen, Smits: Trillingscriteria m.b.t. schade aan gebouwen, TNO rapport B 90-822, 1991.
- [5] Roos, Waarts, Wassing, 2009: Kalibratiestudie schade door aardbevingen, TNO rapport TNO-034-DTM-2009-04435.
- [6] NAM Winningsplan April 2016.
- [7] E-mail SodM aan TNO 29 april 2016.

Datum

13 juni 2016

Onze referentie

M0100296951

Blad

19/19