

*Notitie***Aan**

Staatstoezicht op de Mijnen

Van

Prof. dr. ir. R.D.J.M. Steenbergen

Onderwerp

Berekenen van individueel risico ten gevolge van aardbevingen op basis van sommatie over schadegrenstoestanden

1. Inleiding

Deze notitie betreft het individueel risico voor bewoners van bouwwerken onder aardbevingsbelasting. Er wordt ingegaan hoe om te gaan met de verschillende schadegrenstoestanden (DS1-5) en de bijbehorende overlijdenskansen. Deze notitie is opgesteld naar aanleiding van een verzoek van SodM [11].

De werkwijze van NAM in het winningsplan (april 2016) met betrekking tot het in rekening brengen van de schadegrenstoestanden bij de berekening van het individueel risico wordt beschreven en becommentarieerd.

Deze notitie behandelt eerst een aantal relevante definities. In het tweede deel wordt ingegaan op resultaten van een literatuuranalyse van bouwwerken onder aardbevingsbelasting. Vervolgens wordt de aanpak, die de NAM volgt, beschreven en in context geplaatst.

2. Individueel risico en schadegrenstoestanden

Van belang is het individueel risico voor bewoners van bouwwerken onder aardbevingsbelasting (Box 1). In de analyse van bouwwerken onder aardbevingsbelasting wordt wereldwijd een aanpak gevolgd, waarbij een onderscheid wordt gemaakt in vijf schadegrenstoestanden (Damage States), te weten DS1 tot en met DS5 van kleine schade tot volledig bezwijken. In Figuur 1 wordt een formele beschrijving gegeven van deze schadegrenstoestanden voor metselwerkbouwwerken. Elk van deze schadegrenstoestanden wordt beschreven door een kwetsbaarheidsfunctie (fragility function). Het totale risico dient bepaald te worden door een sommatie over de bijdragen van alle grenstoestanden (Box 2).

Technical SciencesVan 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

M0100296952

E-mail

raphael.steenbergen@tno.nl

Doorkiesnummer

+31 88 866 34 23

Datum
13 juni 2016

Onze referentie
M0100296952

Blad
2/12

Definitie individueel risico

De kans per jaar dat een persoon overlijdt op een locatie binnenshuis als gevolg van een aardbeving wordt gegeven door:

$$P(d) = P(f) \cdot P(d|f) \tag{1}$$






Hierin is $P(d|f)$ de kans op overlijden gegeven instorting.

De kans op instorten volgt uit:

$$P(f) = \int_{-\infty}^{\infty} F_R(a) f_{PGA}(a) da \tag{2}$$

Hierin is $F_R(a)$ de fragility curve en $f_{PGA}(a)$ is de kansdichtheidsfunctie van de PGA berekend in de Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA).

Box 1: Definitie van het individueel risico

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

Figuur 1: Schadegrenstoestanden voor metselwerk bouwwerken (EMS-98, European Seismological Commission, 1998)

Datum
13 juni 2016

Onze referentie
M0100296952

Blad
3/12

Uitdrukking (1) kan als volgt geschreven worden (met D =damage):

$$P(d) = \sum_i P(D = DS_i) \cdot P(d | D = DS_i) \quad (3)$$

De kans $P(D = DS_i)$ kan begrepen worden als de kans $P(DS_i < D < DS_{i+1})$.

$P(d | D = DS_i)$ is de kans op overlijden bij het overschrijden van grenstoestand DS_i :

$$P(D = DS_i) = \int_{-\infty}^{\infty} F_{R,DS_i}(a) f_{PGA}(a) da \quad (4)$$

Voor de grenstoestanden $DS_{1,3}$ is de kans op overlijden op het moment van overschrijden van die grenstoestanden verwaarloosbaar klein omdat dit schade betreft zonder noemenswaardige gevolgen voor mensenlevens.

Er resulteert dus:

$$P(d) = P(D = DS_4) \cdot P(d | D = DS_4) + P(D = DS_5) \cdot P(d | D = DS_5) \quad (5)$$

Box 2: Berekening risico door sommatie over bijdragen grenstoestanden

Bij het overschrijden van de DS4 grenstoestand is er sprake van grote economische schade (het bouwwerk is onbruikbaar geworden), maar het aantal slachtoffers is beperkt (zie relevante HAZUS studies). Er is namelijk sprake van nauwelijks volumeverandering van het bouwwerk en volgens HAZUS (FEMA 2003) levert dit kleine kansen op overlijden (maximaal 0.01).

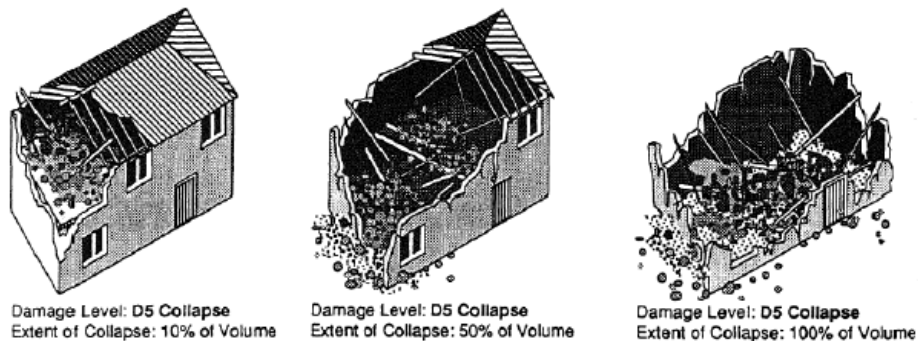
In het geval van overschrijden van de DS5 grenstoestand is de economische schade niet veel meer dan bij DS4 maar het aantal slachtoffers is veel groter. Dit wordt bevestigd in diverse studies en veldobservaties (Coburn and Spence 2002; Marano et al., 2009).

3. DS5 en bijbehorende overlijdenskansen uit de literatuur

Het aantal slachtoffers in het geval van overschrijden van de DS5 grenstoestand hangt af van het type en het gebruik van het bouwwerk. Studies gedaan door So & Pomonis (2012) en (Coburn et al, 1992) maken een nader onderscheid in DS5. Ze geven aan, dat er sprake kan zijn van volumeveranderingen van 10%-100% voor dragend metselwerk. Zie Figuur 2.

Datum
10 juni 2016

Referentie
3952



Figuur 2: Diverse vormen van DS 5 schade, (Coburn et al, 1992)

3.1 Studie door So en Pomonis, 2012

Ten behoeve van een semi-empirisch model hebben So & Pomonis (2012) sterftcijfers afgeleid op basis van empirische gegevens bij DS5. Deze zijn verkregen van 25 significante aardbevingen vanaf 1970. Hier is een duidelijk onderscheid gemaakt in de bij DS5 optredende volumeverandering. Er is een afhankelijkheid gevonden tussen de volumeverandering en de overlijdenskans.

Voor het metselwerk is een onderverdeling gemaakt tussen zwak metselwerk, dragend metselwerk en constructief metselwerk.

- *Zwak metselwerk*
Het type zwak metselwerk wordt opgesplitst in twee bouwmaterialen; adobe en onregelmatige breuksteen. Het metselwerk is gewoonlijk verbonden met modder of kalkmortel. Een verder onderscheid wordt gemaakt in daktype; een zwaar dak of een licht dak. Het volumeverlies en de overlijdenskans ligt aanzienlijk hoger in geval van zware daken dan in geval van lichte daken. In het algemeen bevinden zich in Europa weinig gebouwen van het type zwak metselwerk.
- *Dragend metselwerk*
Dragend metselwerk kan worden gesplitst in twee categorieën; het metselwerk draagt houten of betonnen vloeren. In het algemeen zorgen de betonnen vloeren vanwege o.a. het veel grotere gewicht voor een groter volumeverlies en een hogere overlijdenskans dan houten vloeren.
- *Constructief metselwerk*
Dit betreft metselwerk met speciale voorzieningen voor aardbevingen (wapening, opsluiten, etc.).

Voor Groningen is de categorie 'dragend metselwerk' de meest voorkomende, waarbij de gebouwen zowel betonnen als houten vloeren kunnen hebben.

Datum
13 juni 2016

Onze referentie
M0100296952

Blad
5/12

Tabel 1 – Overlijdenskansen bij instorten voor gemetselde gebouwen met bijbehorend volumeverlies (So en Pomonis, 2012)

Constructietype		Typisch volume-verlies	Overlijdenskans bij instorten, i.e. tot het bijbehorende percentage volumeverlies	Referentieaardbeving
Zwak metselwerk	Adobe licht dak	< 50%	0,10	Pisco, 2007
	Adobe zwaar dak	> 75%	0,4 - 0,6	Ancash, 1970 Iran, 1970 - 2003
	Onregelmatige (breuk)steen met houten hellend dak (laagbouw)	40-60%	0,10 - 0,15	Yogyakarta, 2006 Wenchuan, 2008
	Onregelmatige (breuk)steen betonnen daken (laagbouw)	> 70%	0,15 - 0,30	Kashmir, 2005
Dragend metselwerk	Houten vloeren	> 30%	0,09 - 0,12	Italië, 1970 - 1990
	Betonnen vloeren	> 50%	0,10 - 0,18	Chi Chi, 1999 Wenchuan, 2008
Constructief metselwerk	Constructief metselwerk (laagbouw)	-	0,06 - 0,08	Italië, 1970 - 1990
	Constructief metselwerk (4 - 6 verdiepingen)	-	0,13 - 0,16	Italië, 1970 - 1990
	'Confined' metselwerk volgens code	20%	0,02	Chili, 2011
	'Confined' metselwerk van lage kwaliteit	> 60%	0,30	Haiti, 2010

Het bestuderen van instortingen van laagbouw gebouwen met houten vloeren tijdens aardbevingen in Italië levert volumeveranderingen van ingestorte huizen van >30% met een overlijdenskans van 9-12%.

Voor metselwerkgebouwen met betonnen vloeren levert een studie naar de Wenchuan aardbeving in 2008 iets grotere overlijdenskansen. So & Pomonis (2012) vermelden, dat dit huizen betrof met kanaalplaatvloeren opgelegd op metselwerkwallen zonder wand-vloer verbindingen. Dit is een situatie, die in Groningen ook vaak voorkomt. Ook komen in Groningen situaties voor met massieve betonnen vloeren (breedplaatvloeren), die nog wat zwaarder zijn dan de kanaalplaatvloeren.

3.2 Jaiswal en Wald (2009, 2011)

Jaiswal en Wald (2009, 2011) geven inschattingen van de kans op instorten en bijbehorende sterftecijfers voor enkele gangbare constructietypes. Daarbij is uitgegaan van DS5 – instorting.

De definities voor de verschillende constructietypen zoals aangenomen door Jaiswal en Wald, zijn weergegeven in Tabel 2. Tabel 3 toont de bijbehorende overlijdenskansen bij instorten.

Voor bouwtypen uit de Verenigde Staten is de overlijdenskans bij instorting direct overgenomen van de HAZUS (NIBS-FEMA, 2006) met ‘injury severity level 4’ bij instorten. Voor bouwtypen, welke niet uit de VS komen, wordt gewerkt met overlijdenskansen op basis van generieke cijfers. Bijvoorbeeld, zoals verschaft door UCAM (onderzoeksgroep Cambridge University), waarbij is uitgegaan van overlijden.

Voor bakstenen huizen wordt voor de overlijdenskans bij instorten een waarde gevonden van 0,06. Jaiswal en Wald (2009) maken geen onderscheid naar volumeverandering; het betreft hier dus een gemiddelde over de in Figuur 2 weergegeven DS5 situaties.

Datum

13 juni 2016

Onze referentie

M0100296952

Blad






6/12

Tabel 2 – Definities voor DS5 – instorting voor verschillende bouwmaterialen/types
(Jaiswal en Wald, 2011).

Datum
13 juni 2016

Onze referentie
M0100296952

Blad
7/12

Bouw materiaal	Beschrijving DS5 - instorting	Foto
Adobe	Gedeeltelijk constructief falen van het dak of de vloer als gevolg van verlies aan steun door de muren	
Metselwerk	Falen van een of meer externe muren resulterend in gedeeltelijk of volledig constructief falen van het dak of de vloer	
Hout	Falen van enkele vloer of volledig falen van een deel van het houten skelet	
In situ beton	Falen van enkele vloer of volledig falen van een deel van het skelet	
Stalen skelet	Instorting van dak of vloer als gevolg van instabiliteit in het stalen skelet	

Tabel 3 – Overlijdenskansen bij instorten (Jaiswal en Wald, 2009)

Constructietype	Overlijdenskans bij instorten
Adobe gebouw	0,06
Lemen muur gebouwen	0,06
Niet ductiel betonnen skelet	0,15
Prefab skeletbouw	0,10
Natuursteen metselwerk	0,08
Puin- of veldsteen metselwerk	0,06
Bakstenen metselwerk met kalk / cementmortel	0,06
Stalen skelet met betonnen muren	0,14

Datum

13 juni 2016

Onze referentie

M0100296952

Blad

8/12

3.3 Bevindingen literatuur

In de literatuur wordt gevonden, dat bij DS5 sprake is van minimaal 10% volumeverlies oplopend tot bijna 100%. Bij laagbouw woningen met betonnen vloeren is het volumeverlies zeer groot (50% of meer). Bij houten vloeren kan het volumeverlies iets minder zijn.

Uit de analyse van databases blijkt, dat voor metselwerkgebouwen gemiddeld een overlijdenskans bij instorten wordt gevonden van 6-10% (Jaiswal en Wald, 2009); hier wordt gemiddeld over diverse typen bouwwerken met verschillende volumeveranderingen bij instorten.

Indien specifiek wordt gekeken naar bouwwerktype en –materiaal, dan worden waarden gevonden voor de overlijdenskans bij instorten tot 20% (So & Pomonis, 2012). In Groningen komen situaties voor met massieve betonnen vloeren (breedplaatvloeren), die nog wat zwaarder zijn dan de betonnen vloeren uit (So & Pomonis, 2012). Er kan daarom sprake zijn van nog grotere overlijdenskansen bij instorten.

Er wordt opgemerkt dat de overlijdenskansen voor metselwerk gebouwen, zoals gegeven door So en Pomonis, in het algemeen hoger liggen dan de overlijdenskansen voor metselwerk bouwwerken, zoals gegeven door Jaiswal en Wald (Tabel 3).

4. Aanpak NAM

De aanpak van NAM met betrekking tot het modelleren van schadegrenstoestanden en de gebruikte overlijdenskansen bij het overschrijden ervan kan bepaald worden uit het betreffende achtergronddocument en uit figuren in hoofdstuk 8 van het Technical Addendum bij het Winningsplan april 2016.

4.1 Achtergronddocument Fragility and Consequence

In de winningsplanstudie van april 2016 gaat NAM voor het bepalen van het ‘inside local personal risk’ uit van Versie 2 functions. In het betreffende achtergronddocument¹ gaat NAM uit van een schadegrenstoestand tussen DS4 en DS5 in; dit blijkt uit de in hoofdstuk 7 van dat rapport weergegeven figuren met schadebeelden welke slechts het gedeeltelijk instorten van een bouwwerk betreffen.

¹ Crowley, H., Pinho, R., Polidoro, B., Stafford, P., Development of v2 Fragility and Consequence Functions for the Groningen Field.

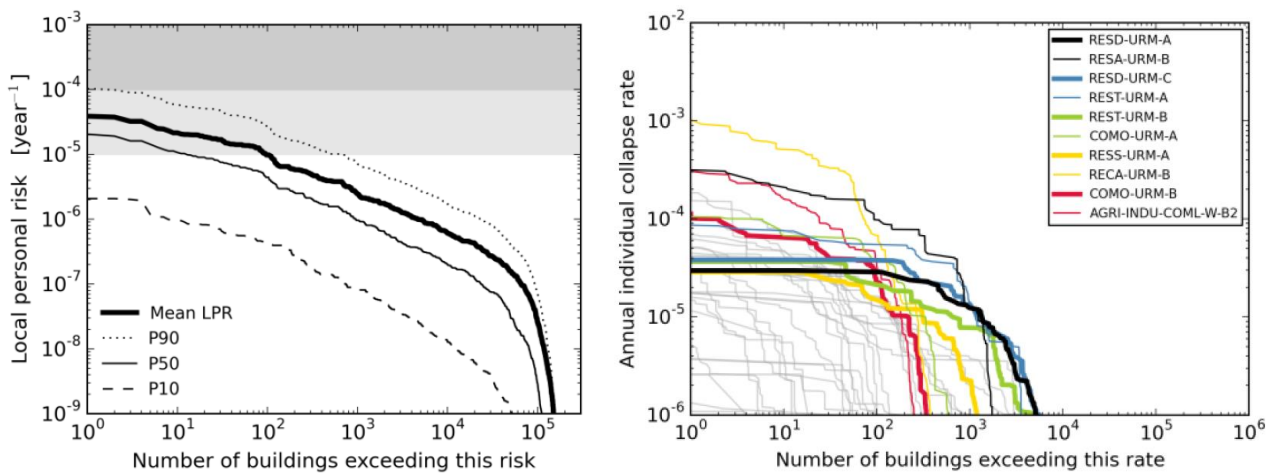
4.2 Hoofdstuk 8 Technical Addendum Winningsplan

Onderstaande figuren zijn de figuren 8.3 en 8.7 uit Hoofdstuk 8 van het Technical Addendum, beide behorend bij het 27 bcm per jaar productieschema. Weergegeven is links het Local Personal Inside Risk (LPR), rechts de instortingskans per jaar per gebouwtype.

Datum
13 juni 2016

Onze referentie
M0100296952

Blad
9/12



Figuur 3: Links: LPR op basis van de volledige logic tree; Rechts: kans op instorten per jaar voor alléén de base case van de logic tree.

Deze figuren bevatten onvoldoende informatie² om de door de NAM in rekening gebrachte overlijdenskans per gebouwtype te kunnen bepalen. Uit discussies met NAM lijkt naar voren te komen, dat de full logic tree bezwijkkansen groter zijn, dan die voor enkel de base case. Voor het meest kwetsbare gebouwtype uit de NAM november 2015 studie (RECA-URM-B) is in de NAM studie van november 2015 sprake van een factor 3 kleiner risico voor alléén de base case³. Het is onduidelijk of dit geldt voor de NAM Winningsplanstudie van april 2016, omdat de logic tree gewijzigd is. Beide logic trees zijn weergegeven in Figuur 4. Beide logic trees zijn hetzelfde op één punt na: de lower case voor de GMPE heeft een kans $p=0$ gekregen in april 2016. Dit geeft meer gewicht aan de bovenzijde van de logic tree en een groter verschil tussen het gemiddelde risico uit de volledige logic tree en de ‘base case’. Deze denkwijze leidt tot de constatering, dat in Figuur 3 voor de linkergrafiek het risico voor de base case kleiner is dan voor de volledige logic tree.

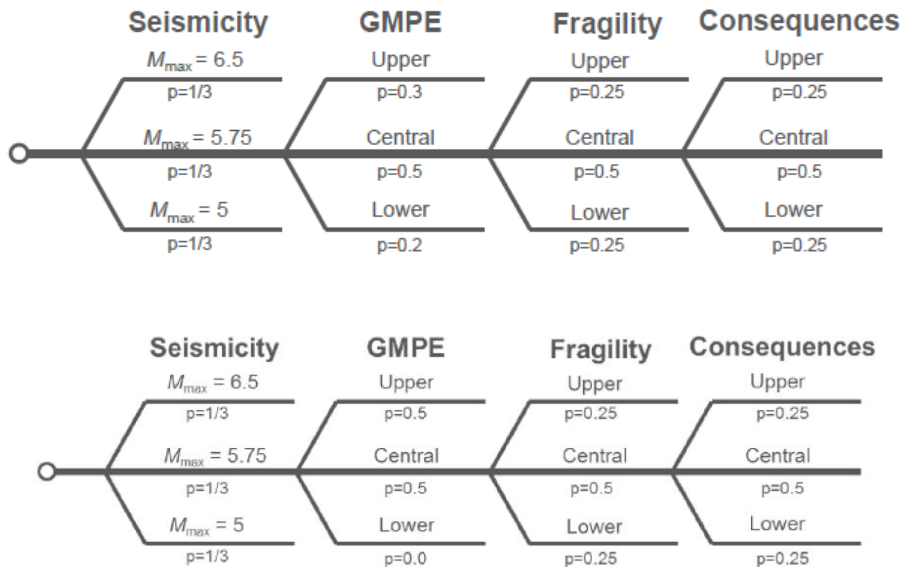
² De verhouding tussen de waarden op de verticale as van de twee grafieken zou de overlijdenskans moeten weergeven. De linker figuur is gebaseerd op de volledige logic tree, terwijl de rechter figuur het resultaat weergeeft van enkel de base case uit de logic tree.

³ Dit blijkt uit studiemateriaal welke ter beschikking gesteld is aan de SAC (Scientific Advisory Committee)

Datum
13 juni 2016

Onze referentie
M0100296952

Blad
10/12



Figuur 4: NAM logic trees uit november 2015 (boven) en april 2016 (onder).

Vergelijken van de linker- en rechtergrafiek uit Figuur 3 levert voor het meest kwetsbare gebouwtype (RECA-URM-B) het volgende op in termen van overlidenskans (Tabel 4), waarbij sprake is van ca. 8% aangenomen volumeverandering bij instorten⁴.

Tabel 4 – Bepaling kans op overlijden bij instorten RECA-URM-B

RECA-URM-B				
Mean LPR o.b.v. volledige logic tree	LPR o.b.v. base case logic tree	Collapse rate o.b.v. base case logic tree	Gebruikte conditionele overlidenskans	Volumeverandering
$4 \cdot 10^{-5}$ /jaar	$< 4 \cdot 10^{-5}$ /jaar	10^{-3} /jaar	$< 4\%$	$< 8\%$

4.3 Implicaties van de door de NAM gevolgde aanpak

De door NAM gevolgde aanpak is gebaseerd op een belangrijke aanname, welke door NAM niet nader is onderbouwd. Deze aanname is dat de bijdrage van gradaties in DS5 met grote volumeverandering (groter dan 8%) in het totale risico dermate klein is, dat deze bijdrage verwaarloosd mag worden. In andere woorden, de volumeverandering wordt niet groter dan circa 8%, ongeacht de zwaarte van de aardbeving. Dit is, gezien de literatuurstudies in hoofdstuk 3⁵, een onjuiste veronderstelling en leidt tot een onderschatting van het risico. Daarnaast is tevens

⁴ Gezien de relatie tussen volumeverandering en conditionele overlidenskans die NAM aangenomen heeft in [10], 4% overlidenskans komt overeen met ongeveer 8% volumeverandering.

⁵ waarnemingen met een volumeverandering van orde 50% of meer.

het uit het vlak bezwijken en daardoor instorten van een bouwwerk niet meegenomen in de aanpak (Box 3, punten 2) en 3)). Omdat juist bij zwaardere aardbevingen geheel of gedeeltelijke instortingen mogelijk zijn met volumeveranderingen > 8% en bezwijken uit het vlak, is het van wezenlijk belang om deze bijdrage van DS5 mee te nemen bij de berekening van het risico.

Datum
13 juni 2016

Onze referentie
M0100296952

Blad
11/12

Relaterend aan uitdrukking (5) kan geschreven worden voor het 'inside local personal risk' :

$$P(d) = P(D = DS_4) \cdot P(d | D = DS_4) + P(D = DS_{4-5}) \cdot P(d | D = DS_{4-5}) + P(D = DS_5) \cdot P(d | D = DS_5) \quad (6)$$

DS_{4-5} is hierin de door NAM gemodelleerde grenstoestand.

De kansen $P(D = DS_i)$ nemen af met toenemende schade, de bijbehorende conditionele overlijdenskansen nemen toe:

- 1) De eerste term in (6) is klein vanwege de kleine overlijdenskans bij DS4; het niet meenemen ervan lijkt gerechtvaardigd.
- 2) De tweede term in (6) wordt door NAM meegenomen, echter het uit het vlak bezwijken wordt niet meegenomen (ref. [6], pagina 80); bij het wel meenemen neemt de faalkans toe.
- 3) De laatste term (DS5) is door NAM niet meegenomen; juist daar is er echter sprake van volledig instorten met hoge waarden voor conditionele overlijdenskans, zoals beschreven in hoofdstuk 3.

Box 3: Overlijdensrisico en schadegrenstoestanden

5. Bevindingen

Bij het bepalen van het overlijdensrisico voor personen in bouwwerken onder aardbevingsbelasting dient gesommeerd te worden over de bijdragen aan dit risico van alle schadegrenstoestanden die een bijdrage leveren aan het overlijdensrisico. Geconstateerd is dat NAM de bijdrage van DS5 met grote volumeveranderingen (geheel of gedeeltelijk instorten, met bijbehorende hogere waarden voor het volumeverlies en grotere overlijdenskansen) niet heeft meegenomen bij de berekening van het overlijdensrisico; ook is het uit-het vlak bezwijken en het daardoor instorten van bouwwerken niet meegenomen. Daardoor is in de berekeningen van NAM sprake van een onderschatting van het risico. De berekende waarden voor het overlijdensrisico ('inside local personal risk') in het NAM Winningsplan van april 2016 zijn dus te laag ingeschat.

Referenties**Datum**

13 juni 2016

Onze referentie

M0100296952

Blad

12/12

- [1] Coburn A.W., Spence R.J.S., Pomonis A., (1992). Factors Determining Casualty Levels in Earthquakes: Mortality Prediction in Building Collapse, *Proc of the 10th WCEE*, Madrid, Spain.
- [2] Coburn, A.W., and Spence, R.J. (2002). *Earthquake Protection*, 2nd Edition, Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- [3] HAZUS multi-hazard loss estimation methodology earthquake model, FEMA 366, Washington, 2003.
- [4] Jaiswal K.S., Wald D.J., Earle P.S., Porter K.A., Hearne M., (2009). Earthquake casualty models within the USGS Prompt Assessment of Global Earthquakes for Response (PAGER) system, *Second International Workshop on Disaster Casualties*, Cambridge, UK.
- [5] Jaiswal K.S., Wald D.J., D'Ayala D., (2011). Developing Empirical Collapse Fragility Functions for Global Building Types, *Earthquake Spectra*, Volume 27, No. 3, pages 775-795.
- [6] Marano, K. D., Wald, D.J. and Allen, T.I. (2009). Global earthquake casualties due to secondary effects: a quantitative analysis for improving rapid loss analyses. *Nat. Hazards.*, v. 49
- [7] Okada S., (1996). Description of indoor space damage degree of building in earthquake, *11th World Conference on Earthquake Engineering*, 3/4 (CD-ROM) Paper no. 1760.
- [8] So E.K.M., Pomonis A., (2012). Derivation of Globally Applicable Casualty Rates for use in Earthquake Loss Estimation Models, *15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisboa.
- [9] NAM Hazard and Risk Assessment for Induced Seismicity in Groningen Interim Update November 2015.
- [10] Crowley, H., Pinho, R., Polidoro, B., Stafford, P., Development of v2 Fragility and Consequence Functions for the Groningen Field.
- [11] E-mail SodM aan TNO 29 april 2016.