

TNO PUBLIEK

Princetonlaan 6  
3584 CB Utrecht  
Postbus 80015  
3508 TA Utrecht[www.tno.nl](http://www.tno.nl)T +31 88 866 42 56  
F +31 88 866 44 75**TNO-rapport****TNO2021 R10441****Publieke Seismische Dreigings- en  
Risicoanalyse Groningen gasveld 2021**

Datum	24 maart 2021
Auteur(s)	
Oplage	1
Aantal pagina's	69 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	6
Projectnaam	publieke SDRA Groningen
Projectnummer	060.47420

Alle rechten voorbehouden.

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

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2021 TNO

TNO PUBLIEK

## Samenvatting

### **Publieke SDRA 2021**

Een Seismische Dreigings- en Risicoanalyse (SDRA) geeft een verwachting van toekomstige seismische grondbewegingen en het resulterende veiligheidsrisico voor de bewoners in het Groningse aardbevingsgebied als gevolg van de gaswinning. Dit rapport beschrijft de publieke SDRA 2021 volgens de door NAM voorgestelde operationele strategie waarop de winning uit het Groningenveld plaats zal vinden.

### **Doel van de dreigingsanalyse**

De seismische dreigingsanalyse berekent de ruimtelijk variërende verwachting van de grondbewegingsintensiteit aan het aardoppervlak als gevolg van geïnduceerde aardbevingen. De resultaten van een seismische dreigingsanalyse worden onder andere gebruikt voor de beoordeling van de aardbevingsbestendigheid van bijvoorbeeld gebouwen, infrastructuur of industriële faciliteiten. Zo maakt de Nederlandse Praktijk Richtlijn (NPR) voor aardbevingsbestendig bouwen in Groningen gebruik van dreigingskaarten voor het vaststellen van de aan te houden aardbevingsbelasting voor beoordeling en ontwerp.

### **Doel van de risicoanalyse**

De seismische risicoanalyse combineert de verwachtingen voor de grondbewegingen met een inschatting van de kwetsbaarheid van de gebouwvoorraad in de regio. Dit leidt tot een inschatting van het Plaatsgebonden Persoonlijk Risico (LPR) per gebouw: dit risico is gedefinieerd als de jaarlijkse kans op overlijden van een persoon in (de directe nabijheid van) een gebouw, als gevolg van het geheel of gedeeltelijk instorten van dat gebouw door aardbevingen. Deze kans laat zich vervolgens toetsen aan de vastgestelde veiligheidsnorm – de Meijdamnorm – om te komen tot een veiligheidsbeoordeling. De uitkomst van deze analyse kan ook worden gebruikt voor de prioritering van de versterking van de meest kwetsbare gebouwen.

### **TNO Modelketen Groningen**

In het verleden heeft NAM de SDRA voor Groningen uitgevoerd onder de titel HRA. De HRA 2020 was de laatste versie. Als gevolg van het voornemen om de betrokkenheid van NAM bij de risicoanalyse te verminderen heeft TNO de opdracht van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK) gekregen om de publieke SDRA Groningen uit te voeren. Hiervoor heeft TNO de Modelketen Groningen onafhankelijk van NAM geïmplementeerd voor toepassing in het publieke domein. Zowel de dreigings- als de risicoanalyse gebruikt probabilistische methoden waarbij de onzekerheden met betrekking tot beperkte kennis en onvolkomenheden in zowel meetgegevens als modellen zo zorgvuldig mogelijk in rekenschap worden genomen.

### **Resultaten publieke SDRA 2021**

- Het jaarlijks aantal bevingen met een magnitude groter dan M1,5 laat een dalende trend zien sinds de afnemende gaswinning per 2014. Deze trend zet zich de komende jaren naar verwachting voort. Het verwachte jaarlijks aantal bevingen neemt af van gemiddeld 5,64 in het gasjaar 2021/2022 tot 2,66 in het gasjaar 2030/2031.

- Het hoogste aantal bevingen per vierkante kilometer ligt ook de komende jaren nog ten noordwesten van Loppersum.
- Als gevolg van het dalend aantal bevingen neemt ook de seismische dreiging, het persoonlijk risico en de kans op schade jaarlijks af.
- De maximale dreiging in termen van piekgrondversnelling (PGA) bij 475 jaar herhalingsstijd bedraagt 0,13 g in het gasjaar 2021/2022. Deze neemt geleidelijk af tot 0,11 g in het gasjaar 2030/2031.
- Alle gebouwen in het aardbevingsgebied voldoen volgens de voorgeschreven modelkeuzes vanaf gasjaar 2021/2022 aan de Meijdamnorm: de verwachtingswaarde van het risico (LPR) voor alle gebouwen is aanzienlijk lager dan  $10^{-5}$  per jaar in gasjaar 2021/2022 en verder.

### Analyse

Voor het uitvoeren van de SDRA 2021 heeft EZK op advies van het Staatstoezicht op de Mijnen voorgeschreven welke modelcomponenten, modelinvoer, en aannames dienen te worden gebruikt. De voorschriften komen in hoge mate overeen met die voor de HRA 2020 door NAM, maar wijken op belangrijke punten af van de aanbevelingen van TNO in het Statusrapport 2020. Een vergelijking voor gasjaar 2021/2022 van de resultaten van de SDRA 2021 met die van de HRA 2020 en met berekeningen op basis van de aanbevelingen van TNO geven inzicht in de gevoeligheid van de resultaten ten aanzien van de modelkeuzes.

Uit deze analyse is het volgende gebleken.

- In vergelijking met de resultaten van de HRA 2020 nemen zowel de overschrijdingskansen van zwaardere bevingen ( $M \geq 3.5$ ) als de seismische dreiging toe. Dit is het gevolg van een hernieuwde kalibratie van het bronmodel door NAM. Een gelijktijdig voorgeschreven wijziging in het grondbewegingsmodel leidt echter uiteindelijk tot vergelijkbare waarden van het persoonlijk risico.
- De aanbevelingen van TNO leiden in het algemeen tot hogere waarden van het persoonlijk risico. In totaliteit leidt dit voor het gasjaar 2021/2022 tot 842 panden die niet aan de Meijdamnorm voldoen.

## Summary

### Public SHRA 2021

A Seismic Hazard and Risk Analysis (SHRA) provides an expectation of the future seismic ground motions and the resulting safety risk for residents in the Groningen earthquake area as a result of the gas extraction. This report describes the public SHRA 2021 according to the operational strategy proposed by NAM on which gas extraction from the Groningen field will take place, given the estimated production level for gas year 2021/2022.

### Scope of the hazard analysis

The seismic hazard analysis calculates the spatially varying expectation of ground motion intensity at the Earth's surface as a result of induced earthquakes. The results of a seismic hazard analysis are used, among other things, to assess the earthquake resistance of, for example, buildings, infrastructure or industrial facilities. For instance, the *Nederlandse Praktijkrichtlijn* (NPR) for earthquake-resistant constructions in Groningen uses hazard maps to determine the earthquake load to be used for building assessment and design.

### Scope of the risk analysis

The seismic risk analysis combines the expectations for the ground motions with an estimate of the vulnerability of the entire building stock in the region. This leads to an estimate of the Local Personal Risk (LPR) per building: this risk is defined as the annual probability of death of a person in (the immediate vicinity of) a building, as a result of the full or partial collapse of that building by earthquakes. This probability can then be verified against the established safety standard - the Meijdam norm - in order to obtain a safety assessment. The outcome of this analysis can also be used to prioritize the strengthening of the most vulnerable buildings.

### TNO Model Chain Groningen

In the past, NAM performed the SHRA for Groningen under the title HRA. The HRA 2020. As a result of the intention to reduce NAM's involvement in the risk analysis, TNO has been commissioned by the Ministry of Economic Affairs and Climate to implement the public SHRA Groningen. To this end, TNO has implemented the Model Chain Groningen independently of NAM for application in the public domain. This hazard and risk analysis uses probabilistic methods in which the uncertainties related to limited knowledge and limitations in both measured data and models are taken into account as carefully as possible.

### Results of the public SHRA 2021

- The annual number of earthquakes with a magnitude of M1.5 and above shows a decreasing trend since the declining gas extraction in 2014. This trend is expected to continue in the coming year. The expected annual number of events decreases from 5.64 in gasyear 2021/2022 to 2.66 in gasyear 2030/2031.
- The largest number of events per square kilometers remain to the northwest of Loppersum in the coming years.
- As a direct result of the decreasing annual number of events, the seismic hazard, personal risk, and probability of damage also decrease on an annual basis.

- The maximum hazard in terms of peak ground acceleration (PGA) with a 475 year return period is 0.13 g in gasyear 2021/2022, and decreases to 0.11g in gasyear 2030/2031.

According to the prescribed modelling choices, all buildings in the earthquake area meet the Meijdam norm: the expectation value of the risk (LPR) for all buildings is significantly lower than  $10^{-5}$  per year in gasyear 2021/2022 and in the following gasyears.

### **Analysis**

The execution of the SHRA 2021 has been performed using model components, model inputs, and assumptions prescribed by the Ministry of Economic Affairs and Climate, on the advice of the State Supervision of Mines. The prescribed choices are largely identical to those used for the HRA 2020, which was performed by NAM. At a number of important points, they deviate from the recommendations by TNO, formulated in the Status Report 2020. A comparison for gasyear 2021/2022 between the results of SHRA 2021, HRA 2020, and calculations based on the recommendations by TNO show the sensitivity of the modelling results with respect to the different modelling choices.

This analysis shows the following:

- Compared to HRA 2020, both the exceedance probability of higher magnitude events ( $M \geq 3.5$ ) and the seismic hazard increase. This is a direct result of the new calibration of the source model by NAM. However, a simultaneously prescribed change in the ground motion model finally leads to very similar value in personal risk, despite the increased seismic hazard.
- In general, the recommendations by TNO lead to higher values for personal risk. Combined, for the gasyear 2021/2022, a total of 842 buildings do not meet the Meijdam norm.

# Inhoudsopgave

<b>Samenvatting</b> .....	<b>2</b>
<b>Summary</b> .....	<b>4</b>
<b>1 Inleiding</b> .....	<b>8</b>
1.1 Van gaswinning naar veiligheidsrisico .....	8
1.2 Publieke SDRA .....	9
1.3 TNO Modelketen Groningen .....	9
1.4 Verwachtingenbrief .....	9
1.5 Doel en opzet van de SDRA rapportage .....	10
<b>2 Modelelementen en modelversies</b> .....	<b>11</b>
2.1 Uitgangspunten volgens de Mijnbouwregeling .....	11
2.2 Extern aangeleverde invoergegevens en informatie .....	12
2.3 Seismologisch bronmodel (SSM) .....	12
2.4 Grondbewegingsmodel (GMM) .....	12
2.5 Kwetsbaarheids- en Gevolgmodel (FCM) .....	13
2.6 Risicomaat .....	13
2.7 Probabilistiek en modelonzekerheden .....	14
<b>3 Analyse van de seismiciteit</b> .....	<b>16</b>
3.1 Seismische activiteit .....	16
3.2 Kans op zwaardere bevingen .....	17
3.3 Jaarlijkse aardbevingsdichtheid .....	17
3.4 Seismiciteit voor koud temperatuurverloop .....	19
<b>4 Dreigingsanalyse</b> .....	<b>21</b>
4.1 Dreigingskaarten .....	21
4.2 Dreiging koud temperatuurverloop .....	24
<b>5 Risicoanalyse</b> .....	<b>27</b>
5.1 Risicoverdeling over de Gebouwendatabase .....	27
5.2 Analyse van epistemische onzekerheden .....	31
5.3 Risico koud temperatuurverloop .....	33
<b>6 Schadeanalyse</b> .....	<b>35</b>
6.1 Schadetoestand bewoonde gebouwen .....	35
6.2 Verwerking externe invoergegevens .....	35
6.3 Voorspelling schadetoestand 2 (DS2) en schadetoestand 3 (DS3) .....	35
6.4 Schadeprognose koud temperatuurverloop .....	38
<b>7 Discussie</b> .....	<b>40</b>
7.1 Wijzigingen SDRA 2021 ten opzichte van HRA 2020 .....	40
7.2 Verschillen tussen SDRA 2021 en HRA 2020 .....	41
7.3 Uitgangspunten gevoeligheidsanalyse .....	43
7.4 Resultaten gevoeligheidsanalyse .....	45
7.5 Slotopmerkingen .....	48
<b>8 Referenties</b> .....	<b>49</b>

<b>9</b>	<b>Ondertekening .....</b>	<b>51</b>
	<b>Appendix A – Seismiciteit per kalenderjaar .....</b>	<b>52</b>
	<b>Appendix B – Dreiging per kalenderjaar.....</b>	<b>54</b>
	<b>Appendix C – Risico per kalenderjaar .....</b>	<b>57</b>
	<b>Appendix D – Disaggregatie van dreiging.....</b>	<b>61</b>
	<b>Appendix E – Disaggregatie van risico.....</b>	<b>65</b>
	<b>Appendix F – Resultaten GVA .....</b>	<b>69</b>

# 1 Inleiding

## 1.1 Van gaswinning naar veiligheidsrisico

Geïnduceerde bevingen door gaswinning ontstaan door ongelijke inzakking (compactie) van een aardgas houdende gesteentelaag langs een eerder gevormde breuk. De gashoudende laag komt dan 'klem' te zitten op de breuk en schiet af en toe los als de spanning te groot wordt. Het aantal aardbevingen in Groningen neemt af sinds 2014. Dit betekent dat de vermindering van de gasproductie sinds 2013 effect heeft. Een seismische dreigings- en risicoanalyse (SDRA) brengt het veiligheidsrisico voor de bewoners in het aardbevingsgebied in kaart.

Een seismische dreigingsanalyse (ook wel hazardanalyse) berekent de ruimtelijk variërende verwachting van de grondbewegingsintensiteit aan het aardoppervlak als gevolg van geïnduceerde aardbevingen. De dreiging wordt uitgedrukt in termen van de (jaarlijkse) kans op overschrijding van een bepaalde intensiteit van de seismische grondbeweging. Vaak wordt ook – in omgekeerde zin – de overschrijdingswaarde bepaald van de grondbewegingsintensiteit die behoort bij een gegeven jaarlijkse kans of herhalingsstijd.

De resultaten van een seismische dreigingsanalyse worden onder andere gebruikt voor de beoordeling van de aardbevingsbestendigheid van gebouwen, infrastructuur of industriële faciliteiten. Zo maakt de Nederlandse Praktijkrichtlijn (NPR) voor aardbevingsbestendig bouwen in Groningen gebruik van dreigingskaarten voor het vaststellen van de aan te houden aardbevingsbelasting voor beoordeling en ontwerp. Een dreigingskaart dient ter onderbouwing van de operationele strategie (OS). Een operationele strategie is een productiescenario waarop de winning uit het Groningenveld plaatsvindt gegeven het winningsniveau uit de jaarlijkse raming van Gasunie Transport Services (GTS).

Een seismische risicoanalyse combineert de verwachtingen voor de grondbewegingen met een inschatting van de kwetsbaarheid van de gebouwvoorraad in de regio. Dit leidt tot een inschatting van het Plaatsgebonden Persoonlijk Risico (*Local Personal Risk – LPR*) per gebouw: dit risico is gedefinieerd als de jaarlijkse kans op overlijden van een persoon in (de directe nabijheid van) een gebouw, als gevolg van het geheel of gedeeltelijk instorten van dat gebouw door aardbevingen. Deze kans laat zich vervolgens toetsen aan de vastgestelde veiligheidsnorm – de Meijdamnorm (Meijdam et al., 2015) – om te komen tot een veiligheidsbeoordeling.

Voor de risicoberekening en schadeprognose wordt gebruik gemaakt van een Gebouwendatabase (*Exposure Database – EDB*), waarin de bouwtechnische gegevens van zo'n 150 duizend panden (binnen de 5km contour rondom het Groningenveld) zijn verzameld op basis van openbaar beschikbare bronnen. De Nationaal Coördinator Groningen (NCG) vertaalt de uitkomsten van de dreigings- en risicoanalyse naar gebouwen op adresniveau, zodat die informatie kan worden gebruikt voor prioritering van de versterking van de meest kwetsbare gebouwen.



## 1.2 Publieke SDRA

De jaarlijkse dreigings- en risicoanalyse (*Hazard and Risk Analysis - HRA*) van het Groningen gasveld is tot en met 2020 uitgevoerd door de operator NAM (Nederlandse Aardoliemaatschappij) ter ondersteuning van één of meerdere operationele strategieën (zie bijvoorbeeld NAM, 2019; 2020). Omdat clusterinzet, oppervlakte-installaties en leveringsverplichtingen onderdeel zijn van een operationele strategie, blijft dit een kerntaak van NAM. In 2018 heeft de Nederlandse overheid besloten (i) de productie uit het Groningenveld zo spoedig als mogelijk te beëindigen, (ii) de betrokkenheid van NAM geleidelijk te verminderen, en (iii) de dreigings- en risicoberekeningen bij een publieke partij te beleggen (EZK, 2018).

De eerste publieke seismische dreiging- en risicoanalyse (SDRA) vindt dit jaar plaats voor de operationele strategie voor het gasjaar 2021/2022, dat loopt van 1 oktober 2021 tot en met 30 september 2022 (EZK, 2020a). In september 2021 neemt de minister van Economische Zaken en Klimaat (EZK) een definitief Vaststellingsbesluit voor gasjaar 2021/2022 voor het Groningenveld (EZK, 2021a).

## 1.3 TNO Modelketen Groningen

In 2019 heeft TNO (Nederlandse organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek) de HRA modellen onafhankelijk van NAM nagebouwd en geïmplementeerd, waarbij voor gelijke invoerwaarden en gelijke modelaannames de TNO-resultaten overeenkomen met de NAM-resultaten (TNO, 2019). Deze rekenmethode bestaat uit een aaneenschakeling van aparte modelcomponenten en wordt de "TNO Modelketen Groningen" genoemd (TNO, 2020a; 2020b). Vervolgens is deze TNO Modelketen Groningen extern beoordeeld en geschikt bevonden voor toepassing in het publieke domein (Tessella, 2020; EZK, 2020a; KEM, 2020).

In oktober 2020 heeft TNO het zogenoemde Statusrapport opgeleverd waarin de technische status van de TNO Modelketen Groningen per 1 oktober 2020 wordt beschreven, alsmede aanbevelingen voor de geschikte modelversies voor gebruik in de publieke SDRA 2021 (TNO, 2020c). Door de modulaire opzet van de TNO Modelketen Groningen kunnen verschillende modelcomponenten worden gecombineerd. Dit geldt ook voor verschillende modelcomponenten die hetzelfde deel van de keten bestrijken. Door middel van een toekenning van gewichten kunnen alternatieve modelkeuzes middels een beslisboom (logic tree) worden gecombineerd.

## 1.4 Verwachtingenbrief

Conform artikel 52c van de Mijnbouwwet heeft EZK (Ministerie van Economische Zaken en Klimaat) NAM verzocht een operationele strategie voor het gasjaar 2021/2022 voor te stellen op basis van de GTS-raming (Gasunie Transport Services) voor datzelfde gasjaar (EZK, 2021a). Het te winnen gasvolume uit het Groningenveld is voor het gasjaar 2021/2022 vastgesteld op 3.9 miljard Nm<sup>3</sup> door de jaarlijkse raming van de netbeheerder (GTS, 2021). Dat is een halvering ten opzichte van huidig gasjaar 2020/2021, waarin de gaswinning uit het Groningenveld ingeschat wordt op 8.1 miljard Nm<sup>3</sup> en een lichte verhoging ten opzichte van de

vorige raming (3.1 miljard Nm<sup>3</sup>) voor gasjaar 2021/2022 van februari 2020 (EZK, 2021b).

Conform artikel 1.3a.2 van de Mijnbouwregeling moet ter onderbouwing van een operationele strategie een dreigings- en risicoanalyse worden opgenomen. EZK heeft aan TNO de opdracht gegeven de publieke SDRA 2021 uit te voeren (EZK, 2020a).

Voor het uitvoeren van deze opdracht maakt TNO gebruik van de eerdergenoemde TNO Modelketen Groningen en de uitgangspunten, invoergegevens, modelversies die door de opdrachtgever zijn vastgelegd in de zogenoemde "Verwachtingenbrief" aan NAM (EZK, 2021a).

## **1.5 Doel en opzet van de SDRA rapportage**

Het doel van dit rapport is het openbaar beschikbaar maken van de resultaten van de publieke SDRA Groningen. De uitgangspunten, invoergegevens en de te hanteren modelversies volgens opdrachtgever voor de dreigings- en risicoanalyse zijn samengevat in Hoofdstuk 2. De gerelateerde resultaten voor de verwachte seismische activiteit, dreiging en risico staan respectievelijk in de Hoofdstukken 3, 4 en 5. Hoofdstuk 6 behandelt de jaarlijkse kans op schade als gevolg van de operationele strategie. Hoofdstuk 7 (Discussie) behandelt de verschillen tussen de resultaten van de SDRA 2021 en de HRA 2020, aanvullend is er een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd.

## 2 Modelelementen en modelversies

### 2.1 Uitgangspunten volgens de Mijnbouwregeling

Artikel 1.3a.2, derde lid, van de Mijnbouwregeling schrijft voor welke elementen dienen te worden opgenomen in de seismische dreigings- en risicoanalyse (SDRA). Voor het gasjaar 2021/2022 omvat dit een uitwerking voor een koud en gemiddeld temperatuurprofiel; voor de jaren daarna volstaat een uitwerking voor een gemiddeld temperatuurprofiel (EZK, 2021a).

TNO heeft met de Modelketen Groningen de onderdelen c, d, e van artikel 1.3a.2, derde lid, van de Mijnbouwregeling berekend en de resultaten in dit rapport openbaar gemaakt. Deze onderdelen betreffen een ontwikkeling van de seismische activiteit en een overzicht van de kans op zwaardere bevingen (Hoofdstuk 3), de ruimtelijke seismische dreiging (Hoofdstuk 4) en berekeningen van het Plaatsgebonden Persoonlijk Risico (*Local Personal Risk – LPR*) en een overzicht van het aantal gebouwen dat niet aan de Meijdamnorm ( $LPR < 10^{-5}$ ) voldoet (Hoofdstuk 5).

Daarnaast heeft TNO volgens uitwerking van onderdeel b, van artikel 1.3a.2, derde lid, van de Mijnbouwregeling een prognose gemaakt van overschrijdingskansen van schadegrenstoestanden DS2 en DS3 op gebouwbasis als gevolg van geïnduceerde bevingen (Hoofdstuk 6).

Bovengenoemde informatie is berekend in de TNO Modelketen Groningen met de door de opdrachtgever voorgeschreven invoergegevens en modelversies, volgens bijlage C van de Verwachtingenbrief, als uitgedrukt in het volgende fragment:

...

*Mede op basis van het advies van SodM stel ik vast dat de dreigings- en risicoanalyse dient te worden uitgevoerd met grotendeels dezelfde keuzes voor modelcomponenten als bij de risicoanalyse van 2020, meer specifiek:*

- *Seismologisch bronmodel versie 6 in dezelfde vorm en met dezelfde weging van de takken in de beslisboom als gebruikt in de HRA voor het gasjaar 2020/2021.*
- *Grondbewegingsmodel versie 6, waarbij voor de 'period-to-period-correlatie' de formulering zoals in de documentatie van NAM wordt aangehouden.*
- *Schade/risicomodel versie 7 in dezelfde vorm, met dezelfde coëfficiënten en met dezelfde weging van de takken in de beslisboom als gebruikt in de HRA voor het gasjaar 2020/2021.*
- *De NAM Exposure Database (gebouwendatabase) versie 7 met de door NAM voorgestelde actualisaties.*

...

Uittreksel uit Bijlage C van de Verwachtingenbrief van EZK aan NAM (EZK, 2021a).

## 2.2 Extern aangeleverde invoergegevens en informatie

Voor het uitvoeren van de publieke SDRA Groningen heeft TNO de volgende invoergegevens ontvangen van NAM (15 februari 2021):

- Kalibratiebestanden van het Seismologisch Bronmodel.
- Ruimtelijke veldeigenschappen. Dit omvat de reservoirdikte, compressibiliteit van de gashoudende laag, en de breuken database.
- Drukken uit het reservoirmodel per tijdstap. Dit omvat onder andere ook de eerdere en toekomstige reservoirporiëndruk behorende bij de operationele strategie op basis van de GTS raming 2021.
- Grondbewegingsmodelparameters en de geometrie van site-response zones volgens modelversie V6.
- Parameters voor het Kwetsbaarheids- en Gevolgmodel volgens modelversie V7.
- Gebouwendatabase extractie (*Exposure Database – EDB*) met versienummer V7.1.

NAM heeft het reservoirmodel gegenereerd op basis van het advies leveringszekerheid voor de benodigde Groningenvolumes en -capaciteiten voor gasjaar 2021/2022 en verder (GTS, 2021).

## 2.3 Seismologisch bronmodel (SSM)

Voor de berekeningen van de ontwikkeling van de seismische activiteit, de aardbevingsdichtheid en de kans op zwaardere bevingen (Hoofdstuk 3) heeft EZK het gebruik van Seismologisch Bronmodel versie V6 (*Seismic Source Model – SSM*) voorgeschreven in dezelfde vorm en met dezelfde weging van de takken in de beslisboom als gebruikt in de HRA van 2020 voor gasjaar 2020/2021 (NAM, 2020). Voor reproduceerbaarheid zijn de volgende specifieke bronmodelinstellingen gebruikt voor het genereren van de resultaten voor de Hoofdstukken 3 tot en met 6, zie Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Instellingen SSM volgens opdracht EZK (2021a). Gewichten staan tussen haakjes.

Versie	V6, exponentiële schuif trend op breuken
Magnitude-frequentie (MF) model	Stress-afhankelijke b-waarde MF- $\beta$ (0.2); stress-afhankelijke taper MF- $\zeta$ (0.8)
Spanningsveld conditie parameters	1 realisatie voor activity rate; en 1 realisatie voor magnitude verdeling (maximum likelihood)
Model kalibratie methode	Gebaseerd op kalibratie verschaft door NAM
Voorspelling gebaseerd op model trainingsperiode	1995-01-01 tot 2021-01-01
Gebruikte posterior	Verschaft door NAM
M <sub>max</sub>	4.0 (0.08625); 4.5 (0.40000); 5.0 (0.24375); 5.5 (0.11250); 6.0 (0.07875); 6.5 (0.05250); 7.0 (0.02625)

## 2.4 Grondbewegingsmodel (GMM)

Voor de berekening van de seismische dreiging (Hoofdstuk 4) heeft EZK het Grondbewegingsmodel versie V6 (*Ground Motion Model - GMM*) vastgesteld. Aanvullend is aangegeven dat “voor de ‘period-to-period-correlatie’ de formulering

zoals in de documentatie van NAM wordt aangehouden"<sup>1</sup>. De volgende grondbewegingsmodelinstellingen zijn gebruikt voor het genereren van de resultaten voor de Hoofdstukken 4 tot en met 6 (Tabel 2.2).

Tabel 2.2 Instellingen GMM volgens opdracht EZK (2021a). Gewichten staan tussen haakjes.

Versie	V6
GMM mediaan- $\tau$	boven (0.30); midden-boven (0.30); midden-onder (0.30); onder (0.10)
GMM $\phi_{ss}$	$\phi_{ss}$ boven (0.50); $\phi_{ss}$ onder (0.50)
Period-to-period correlatiestructuur	Alleen voor referentiegrondbewegingen, niet voor de site response

## 2.5 Kwetsbaarheids- en Gevolgmodel (FCM)

Voor de berekening van het Plaatsgebonden Persoonlijk Risico (*Local Personal Risk – LPR*) en de kans op schade over de Gebouwendatabase (Hoofdstukken 5 en 6) heeft EZK het Kwetsbaarheids- en Gevolgmodel versie V7 (*Fragility and Consequence Model - FCM*) voorgeschreven in dezelfde vorm, met dezelfde coëfficiënten en met dezelfde weging van de takken van de beslisboom als gebruikt in de HRA voor gasjaar 2020/2021 door NAM (2020). Tot slot heeft EZK het gebruik van de Gebouwendatabase versie 7 voorgeschreven met de door NAM voorgestelde actualisaties (versie V7.1). De volgende kwetsbaarheids- en gevolgmodelinstellingen zijn gebruikt voor het genereren van de resultaten voor de Hoofdstukken 5 en 6 (Tabel 2.3).

Tabel 2.3 Instellingen FCM volgens opdracht EZK (2021a). Gewichten staan tussen haakjes.

Version	V7
Kwetsbaarheidsmodel (KWE)	boven (0.17); midden (0.66); onder (0.17)
Gevolgmodel (GEV)	boven (0.25); midden (0.50); onder (0.25)

## 2.6 Risicomaat

Seismisch risico wordt in de publieke SDRA Groningen 2021 uitgedrukt in termen van het Plaatsgebonden Persoonlijk Risico (*Local Personal Risk – LPR*). Voor aardbevingen in Groningen is het LPR als volgt gedefinieerd: "de kans op overlijden van een fictieve [onbeschermde] persoon die zich permanent in of nabij een gebouw bevindt" (NAM, 2020). Gebaseerd op het fundamentele principe dat in Groningen dezelfde veiligheidsstandaard geldt als elders in Nederland, heeft de Commissie Meijdam de norm vastgesteld op  $10^{-5}$  per jaar (Meijdam et al., 2015).

Voor de berekening van het LPR wordt gebruik gemaakt van een zogenoemde Gebouwendatabase (*Exposure Database – EDB*) met beschrijving van het gebouwenbestand in Groningen en van zogenoemde kwetsbaarheidscurven, die de reactie van die gebouwen op een grondbeweging beschrijft. De relatie tussen het instortingspercentage (vloerpercentage bedekt met puin) en de kans op overlijden in het gebouw wordt beschreven door het Gevolgmodel (NAM, 2020). De hier gebruikte modelversie van het Kwetsbaarheids- en Gevolgmodel (FCM) is beschreven in sectie 2.5.

<sup>1</sup> EZK (2021a) bedoelt hiermee "exclusief site response period-to-period-correlatie".

## 2.7 Probabilistiek en modelonzekerheden

De TNO Modelketen Groningen maakt gebruik van probabilistische methoden waarbij de onzekerheden met betrekking tot beperkte kennis en onvolkomenheden in zowel meetgegevens als modellen zo zorgvuldig mogelijk in rekenschap worden genomen.

We onderscheiden twee soorten onzekerheden: aleatoir en epistemisch. Aleatoire onzekerheden zijn statistische variaties die verband houden met de willekeurigheid van het systeem dat wordt onderzocht, bijvoorbeeld de tijd en locatie van aardbevingen die niet individueel te voorspellen zijn. Over het algemeen worden aleatorische onzekerheden beschouwd als niet-reduceerbaar door metingen of modelverbeteringen. In de TNO Modelketen worden deze onzekerheden zo goed mogelijk gekwantificeerd in de vorm van kansverdelingen. Deze worden vervolgens volledig doorgerekend tot in het eindresultaat.

Epistemische of modelonzekerheden houden verband met onvolkomenheden van het model, zoals vereenvoudigingen, theoretische aannames en beperkingen in de nauwkeurigheid van gegevens die worden gebruikt voor de kalibratie van het model. Epistemische onzekerheden worden vaak beschouwd als reduceerbaar, omdat ze door meer kennis te verzamelen in principe kleiner zouden kunnen worden. In de praktijk is dat vaak echter niet mogelijk binnen realistische kaders van tijd en middelen.

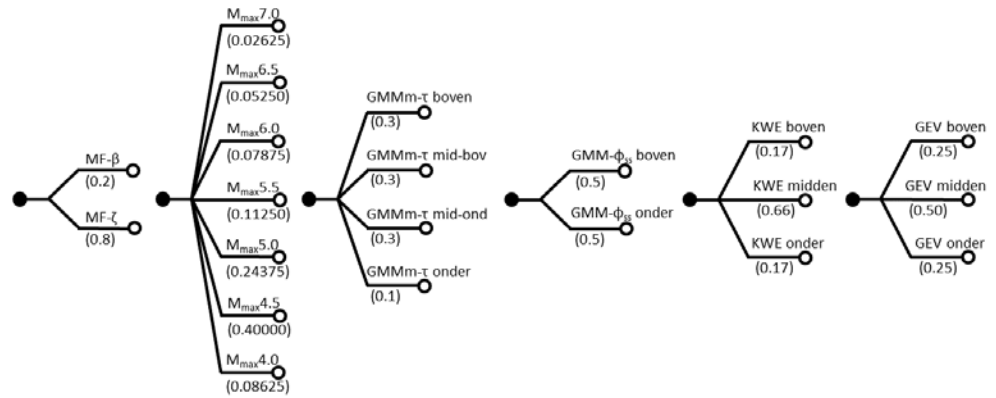
Om rekening te houden met epistemische onzekerheden wordt een “logic tree” gebruikt. Het gebruik van de term “logische boom” in deze context is ongewoon in het Nederlands, vandaar dat we hier de vergelijkbare term “beslisboom” hanteren. De beslisboom voor de SDRA 2021 is weergegeven in Figuur 2.1. Elk van de zes vertakkingsniveaus van de beslisboom vertegenwoordigt een aantal modelalternatieven. De som van de gewichten die aan elke vertakking zijn toegewezen, moet optellen tot één voor elk vertakkingsniveau. De keuze van modelalternatieven in de beslisboom en de vaststelling van de gewichten maken geen deel uit van de TNO Modelketen. Deze keuzes zijn deel van de opdracht.

De TNO Modelketen kan worden gebruikt voor een enkele combinatie van takken, of voor de volledige verdeling van de (in dit geval  $2 \times 7 \times 4 \times 2 \times 3 \times 3 = 1008$ ) takcombinaties. Het gewogen gemiddelde van deze takken geeft de verwachtingswaarde van de probabilistische berekening. Ook percentielen als de P10 en de P90 kunnen uit deze verdeling bepaald worden. De uitvoer van de TNO Modelketen (de verwachtingswaarde van het Persoonsgebonden Lokaal Risico) omvat alle epistemische onzekerheden die zijn vastgelegd in de beslisboom.

De beslisboom voor de SDRA 2021 omvat zes vertakkingsniveaus:

1. het magnitude-frequentiemodel (MF),
2. de maximaal mogelijke aardbevingsmagnitude ( $M_{\max}$ ),
3. het grondbeweging mediaan- $\tau$ -model (GMM- $\tau$ ),
4. het grondbeweging variabiliteit  $\phi_{ss}$ -model (GMM- $\phi_{ss}$ ),
5. het kwetsbaarheidsmodel van gebouwen (KWE), en
6. het gevolgmiddel (GEV).

In Figuur 2.1 zijn deze zes vertakkingsniveaus en hun waarden en gewichten in een beslisboom weergegeven overeenkomstig met de waarden en gewichten in Tabellen 2.1-2.3.



Figuur 2.1 Structuur, waarden en gewichten van de beslisboom (logic tree) voor de probabilistische seismische dreigingsanalyse (linker vier vertakkingsniveaus) en probabilistische seismische risicoanalyse (alle vertakkingsniveaus) naar NAM (2020). MF is het magnitude-frequentiemodel. GMMm- $\tau$  staat voor het grondbeweging mediaan-  $\tau$ -model. GMM- $\phi_{ss}$  is het grondbeweging variabiliteit  $\phi_{ss}$ -model. KEV staat voor kwetsbaarheidsmodel en GEV staat voor gevolgmodel. Het gewicht per tak staat tussen haakjes.

### 3 Analyse van de seismiciteit

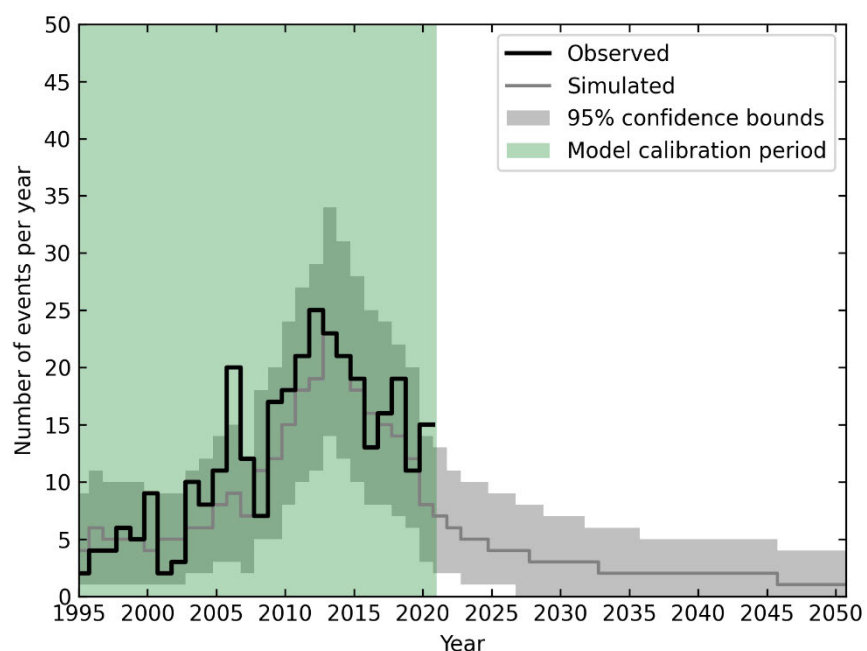
Dit hoofdstuk bevat de resultaten van de ontwikkeling van de seismische activiteit (sectie 3.1), de kans op zwaardere bevingen (sectie 3.2) en het verloop van de jaarlijkse aardbevingsdichtheid (sectie 3.3) volgens de uitgangspunten, invoergegevens en modelaanname uit Hoofdstuk 2.

De resultaten zijn weergegeven in gasjaren en zijn gebaseerd op de operationele strategie van NAM volgens de GTS-raming 2021 voor een gemiddeld temperatuurverloop (sectie 3.1 tot en met 3.3) en koude winter temperatuurverloop (sectie 3.4). De resultaten per kalenderjaar voor een gemiddeld temperatuurverloop zijn weergegeven in Appendix A.

#### 3.1 Seismische activiteit

De historisch waargenomen en de totale verwachte jaarlijkse seismische activiteit en variabiliteit per gasjaar is weergegeven in Figuur 3.1 voor een gemiddelde temperatuurverloop. Alleen bevingen met een magnitude gelijk aan of hoger dan 1.5 zijn opgeteld per gasjaar en zijn weergegeven tot 1 oktober 2050. Het aantal bevingen laat een dalende trend zien sinds 2014. Dit is het gevolg van een afnemende gaswinning sinds 2014. Vanaf 2022 wordt een sterkere daling van het aantal bevingen verwacht als gevolg van het insluiten van het Groningenveld voor gasproductie (EZK, 2021b). Tot 2026 zal het veld naar verwachting wel operationeel blijven in een stand-by modus als capaciteits- en leveringszekerheidsmiddel (EZK, 2021b).

In Figuur A.1 in Appendix A is op vergelijkbare wijze de historische en totale verwachte jaarlijkse seismische activiteit en variabiliteit voor een gemiddeld temperatuurverloop weergegeven per kalenderjaar.





Figuur 3.1 Verwachte seismische activiteit en variatie per gasjaar voor een gemiddeld temperatuurverloop. Op de horizontale as staat het kalenderjaar (bereik 1 januari 1995 tot 1 oktober 2050). Op de verticale as staat het aantal bevingen met een magnitude gelijk aan of hoger dan 1.5 opgeteld per gasjaar. De zwarte lijn geeft het aantal observaties in het verleden weer. De donkergrijze lijn geeft het verwachte aantal bevingen in de toekomst weer. De lichtgrijze band om de grijze lijn is de onzekerheidsband. Het groene vlak geeft aan dat het model gekalibreerd is op de periode tot 1 januari 2021.

### 3.2 Kans op zwaardere bevingen

De overschrijdingskans op zwaardere bevingen is per gasjaar weergegeven in Tabel 3.1 voor een gemiddeld temperatuurverloop. De tabel geeft een overzicht van de tien komende gasjaren, beginnend met het eerstvolgende gasjaar 2021/2022.

Voor het Groningengebied beschouwen we bevingen met een magnitude gelijk of hoger dan 3.5 als zwaardere bevingen. Ter vergelijking, de Huizingebeving van augustus 2012 had een magnitude van 3.6. De percentages in de tabel zijn de overschrijdingskansen per gasjaar. Zo is er bijvoorbeeld een kans van 1.5% dat een beving met een magnitude van 4.0 of hoger optreedt in het gasjaar 2021/2022 in het Groningenveld. Ter vergelijking, in de NAM HRA van 2020 was voor hetzelfde gasjaar 2021/2022 de overschrijdingskans op zo'n beving 0.94% (NAM, 2020). Voor hogere magnitudes zijn de overschrijdingskansen ook toegenomen sinds de HRA 2020 (NAM, 2020). Voor nadere uitleg zie Hoofdstuk 7.

In Tabel A.1 in Appendix A is op vergelijkbare wijze de jaarlijkse overschrijdingskans per kalenderjaar weergegeven voor een gemiddeld temperatuurverloop.

Tabel 3.1 Jaarlijkse verwachting van het aantal bevingen met magnitude gelijk aan of hoger dan M1.5 ("Rate") en overschrijdingskansen voor een aantal geselecteerde magnitudes per gasjaar voor een gemiddeld temperatuurverloop. De eerste kolom geeft het gasjaar (*gas year – GY*) weer.

	Rate	M3.5	M3.6	M4.0	M4.5	M5.0
GY2021/2022	5.64	6.78%	5.15%	1.46%	0.20%	0.03%
GY2022/2023	4.98	6.02%	4.57%	1.30%	0.18%	0.03%
GY2023/2024	4.56	5.51%	4.18%	1.19%	0.16%	0.02%
GY2024/2025	4.18	5.06%	3.84%	1.09%	0.15%	0.02%
GY2025/2026	3.85	4.67%	3.54%	1.00%	0.14%	0.02%
GY2026/2027	3.53	4.28%	3.24%	0.91%	0.12%	0.02%
GY2027/2028	3.27	3.96%	2.99%	0.84%	0.11%	0.02%
GY2028/2029	3.03	3.66%	2.77%	0.78%	0.11%	0.02%
GY2029/2030	2.83	3.42%	2.58%	0.72%	0.10%	0.01%
GY2030/2031	2.66	3.21%	2.42%	0.68%	0.09%	0.01%

### 3.3 Jaarlijkse aardbevingsdichtheid

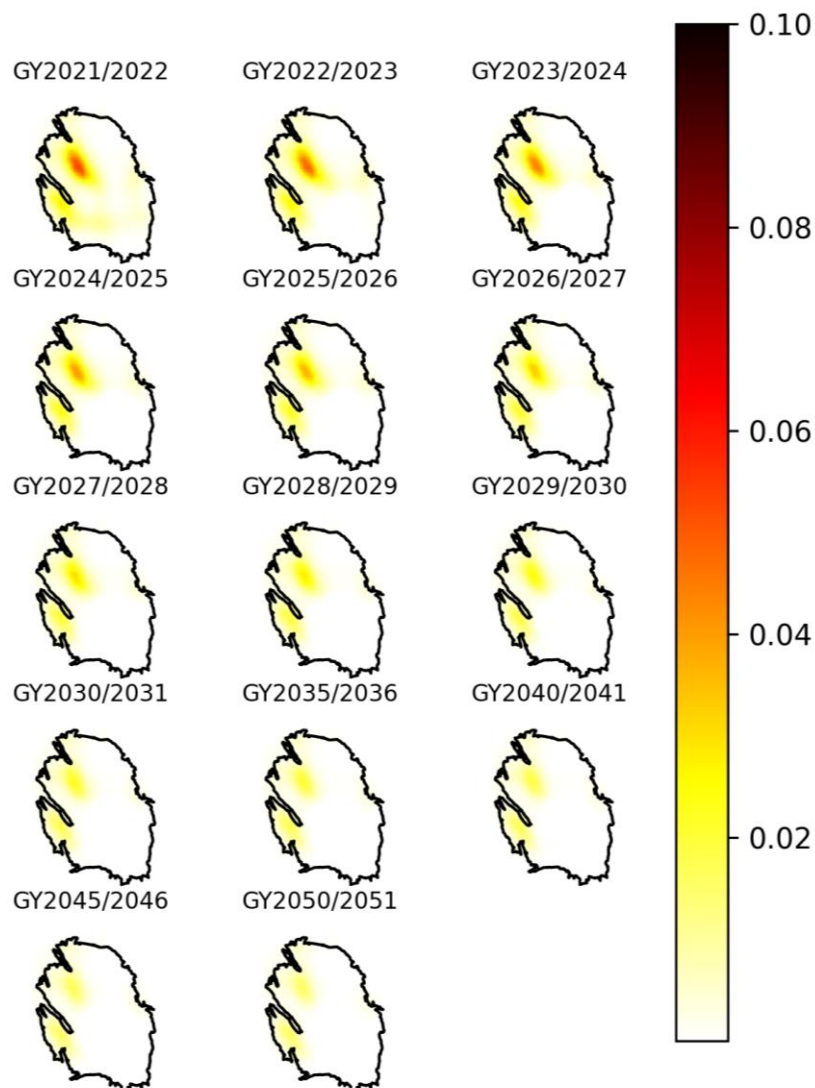
De verwachte jaarlijkse aardbevingsdichtheid voor gasjaren 2021/2022 tot en met 2030/2031 en vervolgens in stappen van vijf jaar tot 2050/2051, is weergegeven in Figuur 3.2 voor een gemiddeld temperatuurverloop. De jaarlijkse aardbevingsdichtheid is het verwachte aantal bevingen met een magnitude gelijk of hoger dan 1.5 per vierkante kilometer per jaar. De kleurenschaal voor alle

deelfiguren is identiek, zodat inzichtelijk wordt dat het verwachte aantal bevingen de komende jaren afneemt.

Het hoogste aantal bevingen per vierkante kilometer ligt in de komende jaren ten noordwesten van het Loppersumgebied.

In Figuur A.2 in Appendix A is ook de jaarlijkse aardbevingsdichtheid weergegeven tot en met kalenderjaar 2030 in stappen van één kalenderjaar.

### Forecasted annual event density [km<sup>-2</sup>]

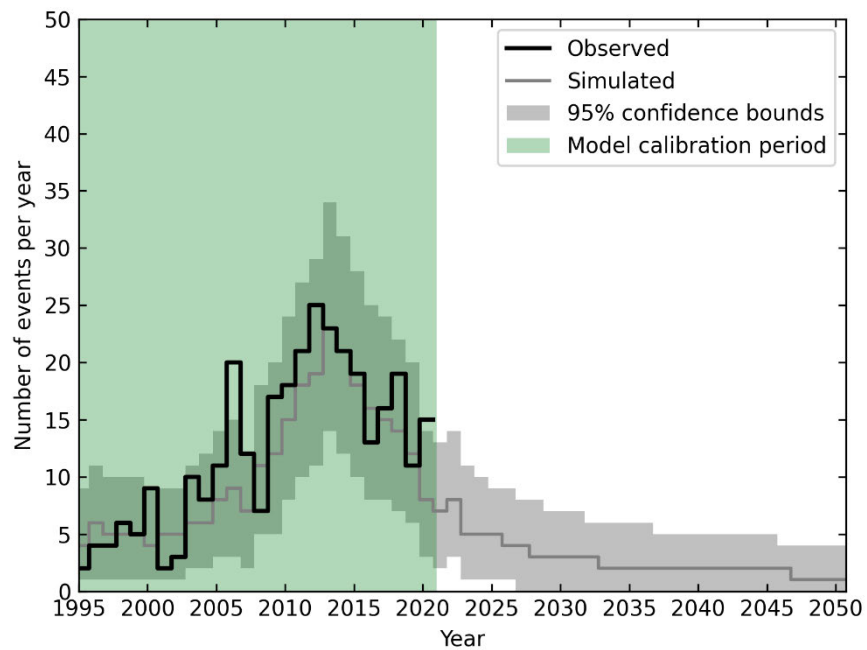


Figuur 3.2 Jaarlijkse aardbevingsdichtheidskaarten (*Forecasted annual event density maps*) voor gasjaar 2021/2022 tot en met gasjaar 2030/2031 in stappen van één gasjaar, gevolgd door de kaarten tot en met gasjaar 2050/2051 in stappen van vijf jaar. De kaarten zijn

gebaseerd op de operationele strategie van NAM als uitwerking van de GTS-raming 2021 voor een gemiddeld temperatuurverloop.

### 3.4 Seismiciteit voor koud temperatuurverloop

Vergelijkbaar met Figuur 3.1 voor een gemiddeld temperatuurverloop is de historische en totale verwachte jaarlijkse seismische activiteit en variabiliteit per gasjaar weergegeven in Figuur 3.3 voor een temperatuurverloop met een koude winter.



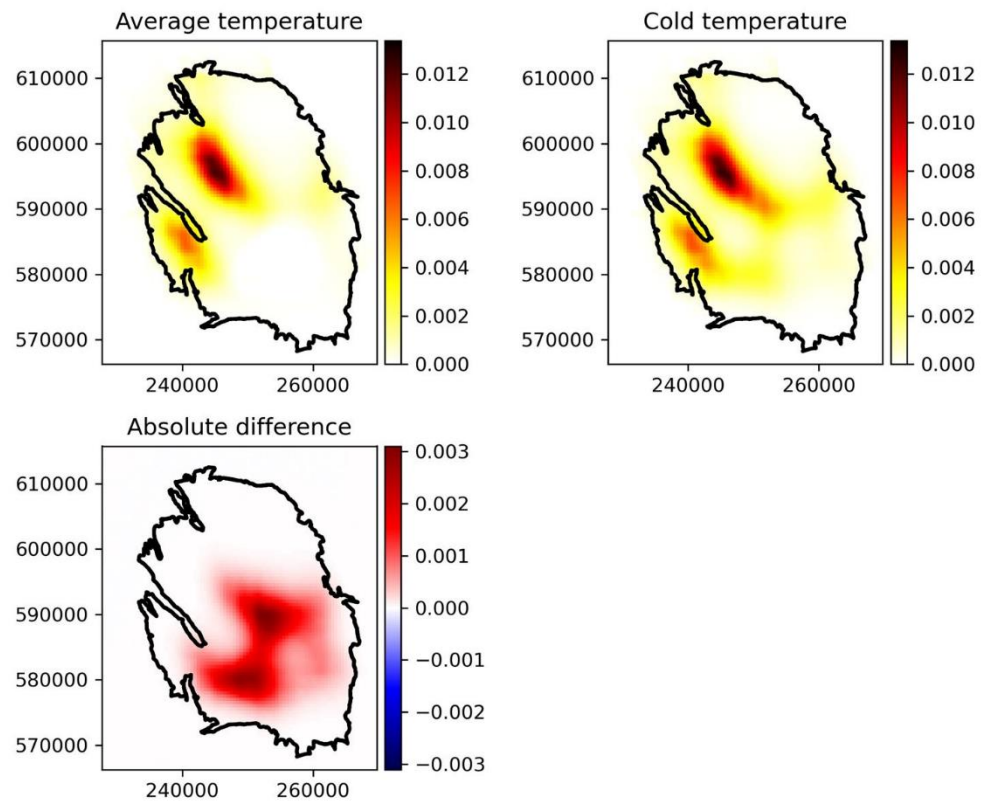
Figuur 3.3 Verwachte seismische activiteit en variatie per gasjaar voor een koud temperatuurverloop. Onderschrift als in Figuur 3.1.

Vergelijkbaar met Tabel 3.1 is de overschrijdingskans van zwaardere bevingen per gasjaar weergegeven in Tabel 3.2 voor een koud temperatuurverloop.

Tabel 3.2 Jaarlijkse overschrijdingskans voor een aantal geselecteerde magnitudes per gasjaar voor een koud temperatuurverloop. Bijschrift als in Tabel 3.1.

	Rate	M3.5	M3.6	M4.0	M4.5	M5.0
GY2021/2022	7.46	9.09%	6.93%	1.96%	0.26%	0.04%

In Figuur 3.4 is het verschil in jaarlijkse aardbevingsdichtheid tussen een koud en gemiddeld temperatuurverloop weergegeven voor gasjaar 2021/2022.



Figuur 3.4 Absolute verschil in jaarlijkse aardbevingsdichtheid (aardbeving per km<sup>2</sup>) tussen een koud en een gemiddeld temperatuurverloop voor gasjaar 2021/2022. Op de horizontale en verticale assen zijn de coördinaten volgens het Rijksdriehoekstelsel (RD) weergegeven.

## 4 Dreigingsanalyse

Dit hoofdstuk bevat de resultaten van de seismische dreigingsanalyse volgens de uitgangspunten, invoergegevens en modelversies uit Hoofdstuk 2. Sectie 4.1 toont de ontwikkeling van de seismische dreiging aan de hand van dreigingskaarten.

De dreigingsresultaten in dit hoofdstuk zijn weergegeven in gasjaren en zijn gebaseerd op de operationele strategie van NAM als uitwerking van het productieniveau volgens de GTS-raming 2021 voor een gemiddeld temperatuurverloop (sectie 4.1) en voor een koude winter temperatuurverloop (sectie 4.2). De resultaten voor kalenderjaren zijn weergegeven in Appendix B.

Appendix D geeft een uitsplitsing (disaggregatie) weer van de seismische dreiging op geselecteerde geografische locaties naar de bijdragen van de magnitude, breukafstand en grondbewegingsvariabiliteit. Appendix D toont ook de ruimtelijke variatie van deze uitsplitsing.

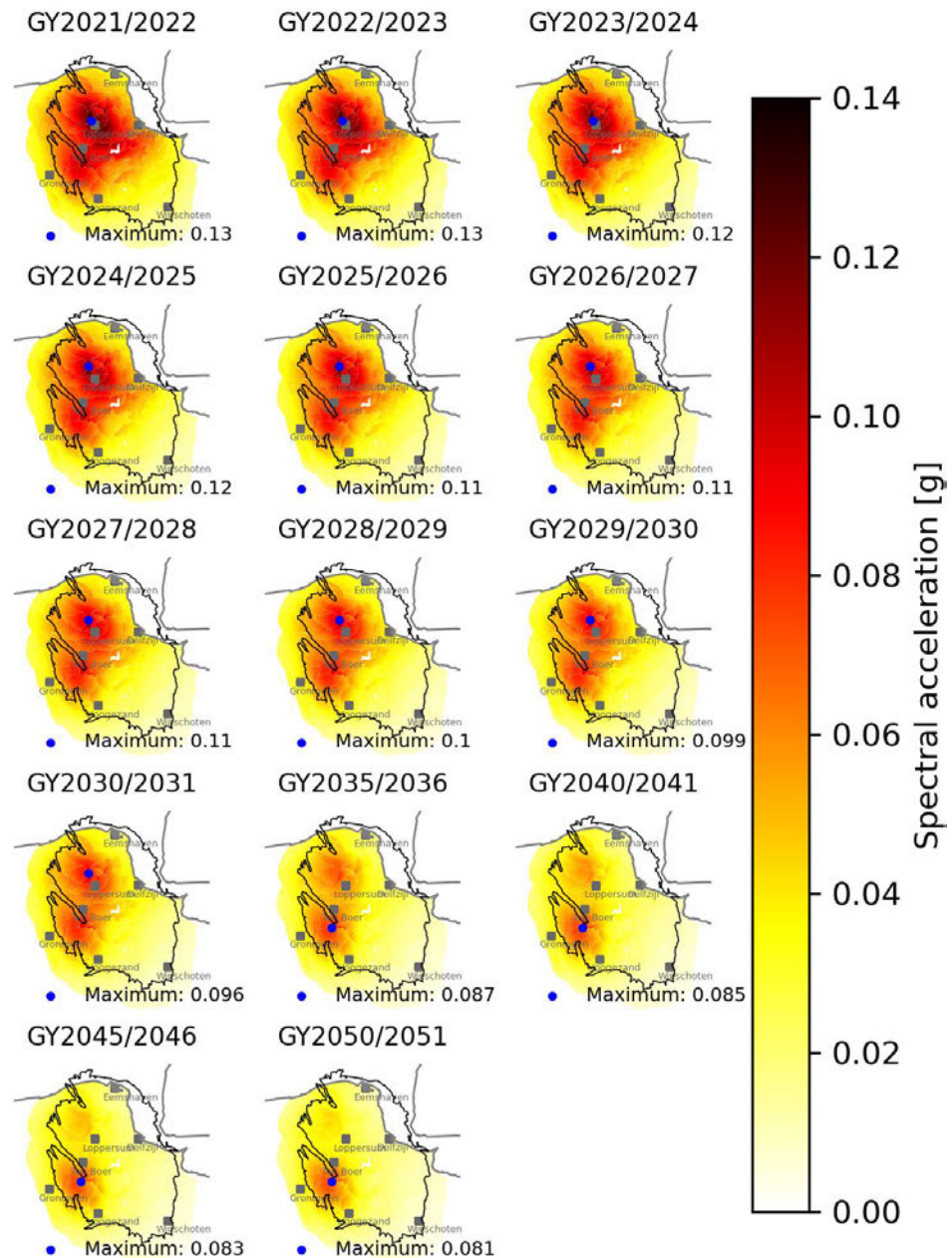
### 4.1 Dreigingskaarten

Dreigingskaarten (ook wel hazardkaarten) geven de intensiteit van seismische grondbewegingen weer voor een gegeven kans van overschrijding. Deze kans wordt doorgaans gerelateerd aan een herhalingstijd. Traditioneel wordt als intensiteitsmaat voor een seismische grondbeweging vaak de piekgrondversnelling (*Peak Ground Acceleration – PGA*) gebruikt. In het grondbewegingsmodel van Bommer et al. (2019) wordt feitelijk niet de PGA berekend, maar de zogenaamde spectrale versnelling (*Spectral Acceleration - SA*) bij een aantal trillingsperioden. De spectrale versnelling bij de korte trillingsperiode van 0.01 s komt in de praktijk overeen met PGA. De herhalingstijd van 475 jaar is de huidige technische standaardkeuze voor structureel ontwerp volgens de Eurocode 8. Deze periode is gebaseerd op een overschrijdingskans van 10% in 50 jaar, of 0.2105% per jaar. Andere spectrale perioden en herhalingstijden zijn ook belangrijk voor de berekening van het seismisch risico (Hoofdstuk 5).

De verwachte seismische dreiging bij een herhalingstijd van 475 jaar voor gasjaar 2021/2022 tot en met gasjaar 2050/2051 is weergegeven in Figuur 4.1 in stappen van eerst één en vervolgens vijf gasjaren voor een gemiddeld temperatuurverloop. Zoals verwacht neemt als gevolg van de dalende gasproductie de seismische dreiging jaarlijks af voor het gemiddelde temperatuurscenario. Dit is in overeenstemming met de drukvereffening van het reservoir tijdens de latere jaren, het zogenoemde 'remwegeffect' (NAM, 2020). Het aardgas van het hogere gasdrukgebied ten noordwesten van Loppersum blijft naar de lagere gasdrukgebieden in het zuidoosten stromen, ondanks de geringe nog te produceren gasvolumes. De continue afname van reservoirdruk ten noordwesten van het Loppersum gebied zorgt daar dan voor een relatief hogere seismische dreiging.

Vergelijkbaar met Figuur 4.1 geeft Figuur B.1 in Appendix B een overzicht van de jaarlijkse seismische dreigingskaarten bij 475 jaar herhalingstijd voor kalenderjaar 2021 tot en met kalenderjaar 2030 in stappen van één kalenderjaar voor een gemiddeld temperatuurverloop.

## Sa[0.01] - return period 475 years

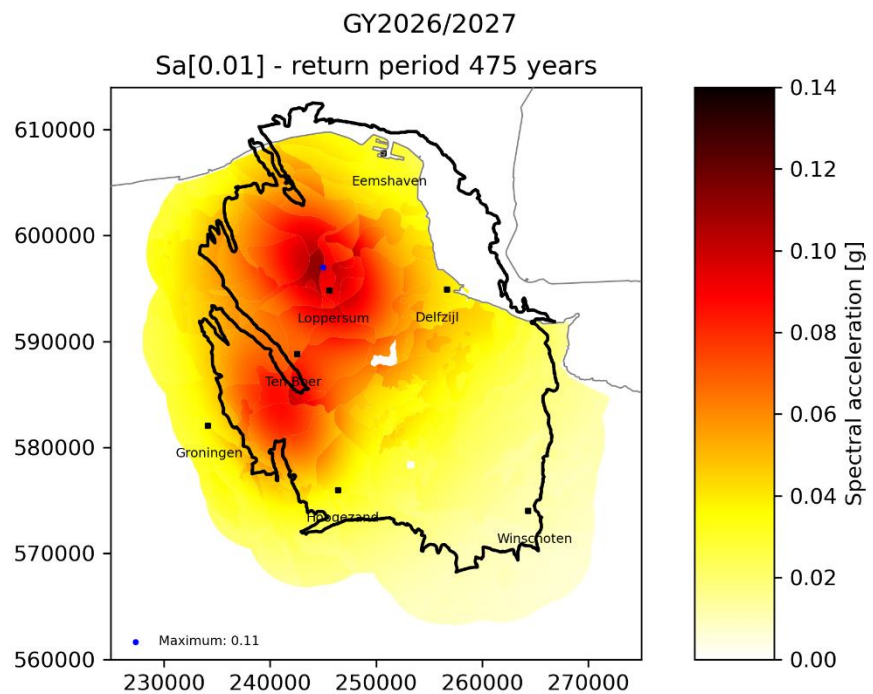
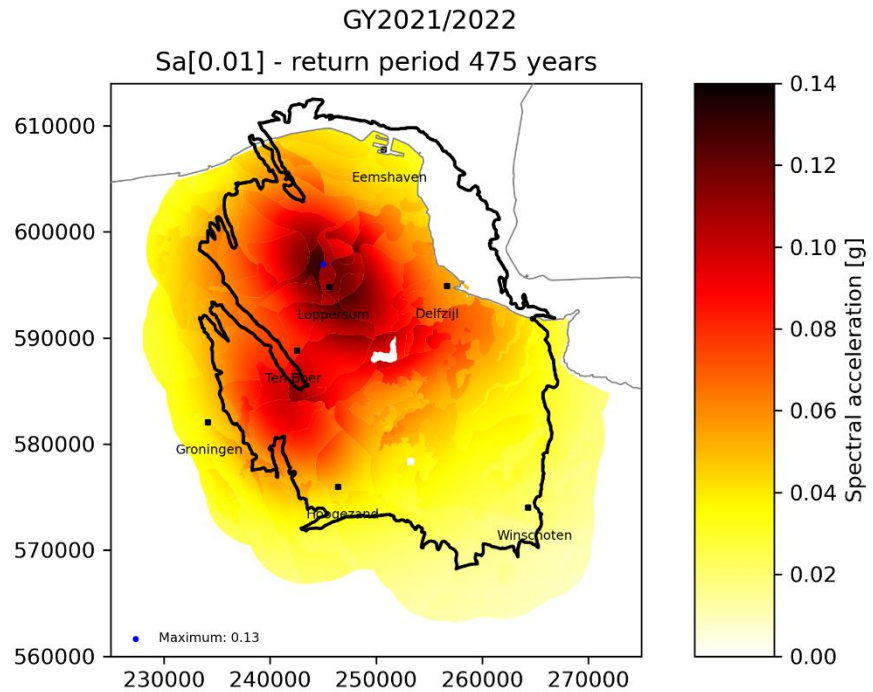


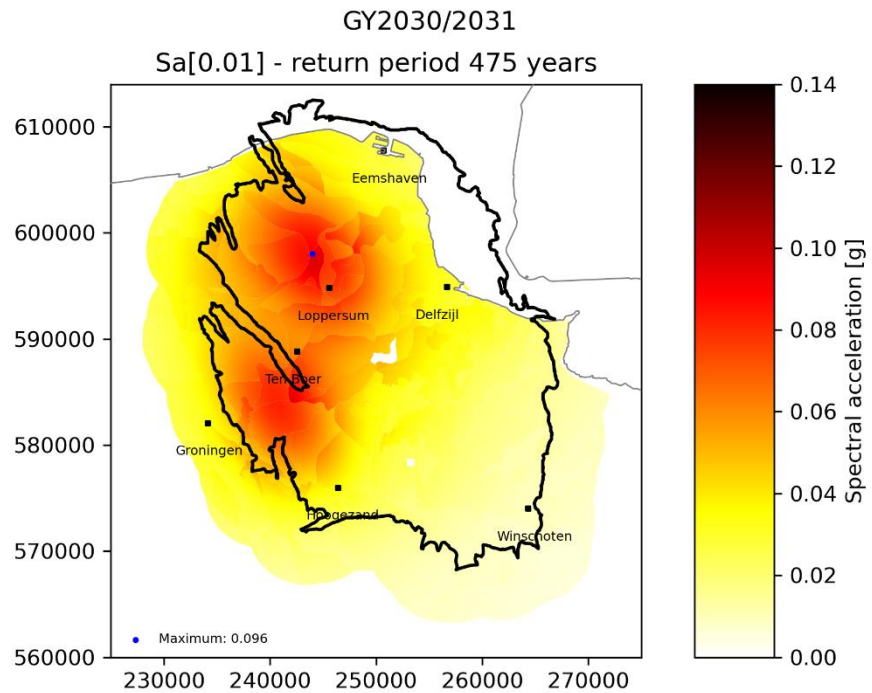
Figuur 4.1 Overzicht van de jaarlijkse seismische dreigingskaarten voor gasjaar 2021/2022 tot en met gasjaar 2030/2031 in stappen van één gasjaar. De kaarten zijn gebaseerd op de operationele strategie van NAM volgens de GTS-raming 2021 voor een gemiddeld temperatuurverloop.

In Figuur 4.2 is de seismische dreiging bij 475 jaar herhalingsstijd weergegeven in kaarten op groot formaat, zodat zichtbaar is dat de locatie van de maximale spectrale versnelling zich in de loop van de tijd noordwestwaarts van Loppersum verplaatst.



Vergelijkbaar met Figuur 4.2 zijn in Figuur B.2 in Appendix B de jaarlijkse seismische dreigingskaarten weergegeven voor kalenderjaar 2021 tot en met kalenderjaar 2030 voor een gemiddeld temperatuurverloop.



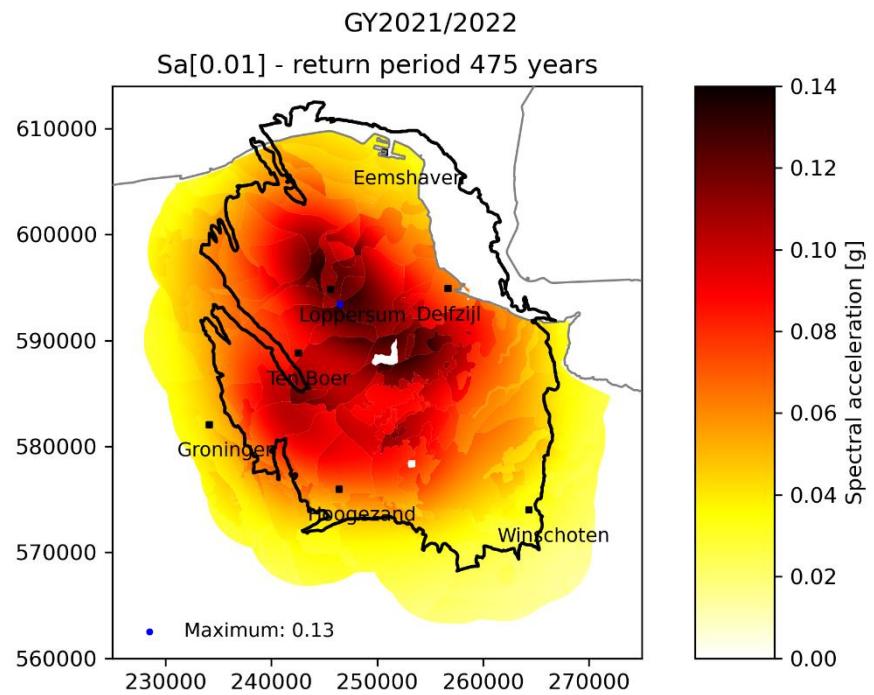


Figuur 4.2 Seismische dreigingskaarten voor de gasjaren 2021/2022, 2025/2026 en 2030/2031. De kaarten zijn gebaseerd op de operationele strategie van NAM volgens de GTS-raming 2021 voor een gemiddeld temperatuurverloop. Deze kaarten in groot formaat zijn identiek aan de mozaïekkaarten van Figuur 4.1 voor de getoonde gasjaren.

## 4.2 Dreiging koud temperatuurverloop

Vergelijkbaar met Figuur 4.2 voor een gemiddeld temperatuurverloop is de seismische dreiging in Figuur 4.3 weergegeven voor een koud temperatuurverloop voor gasjaar 2021/2022. Opvallend is dat de locatie van de maximale spectrale versnelling voor dit winningsplan ten zuidoosten van Loppersum ligt.

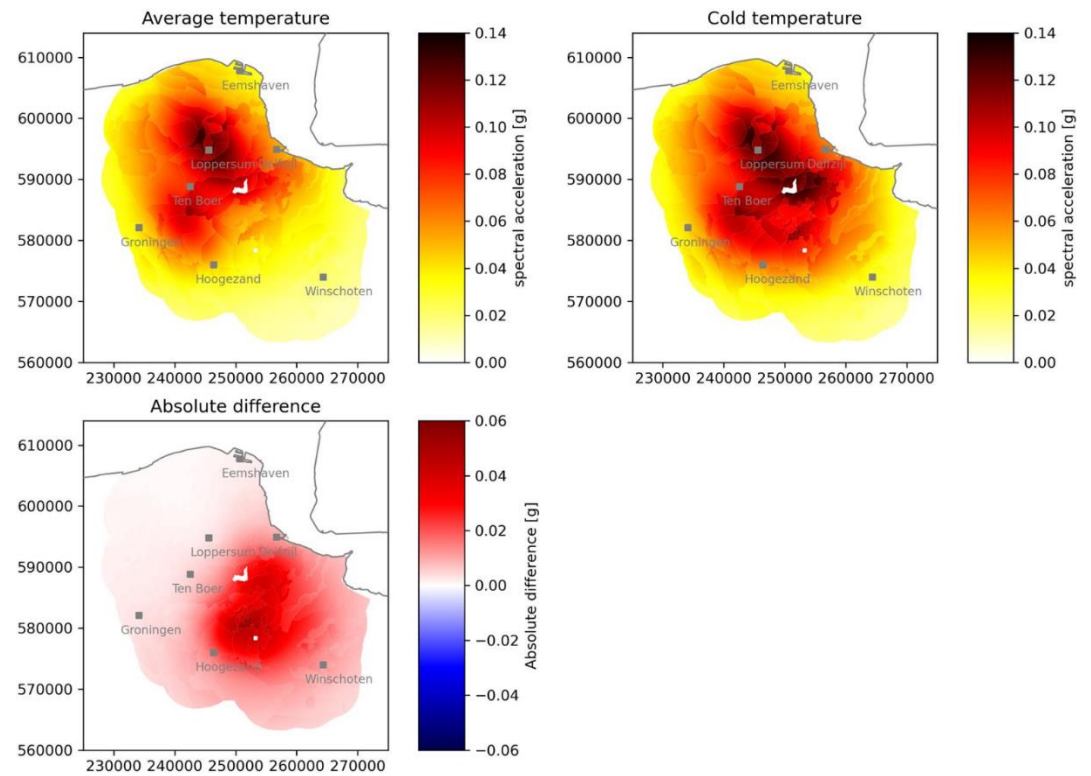




Figuur 4.3 Seismische dreigingskaart voor gasjaar 2021/2022 voor een koud temperatuurverloop. Onderschrift als in Figuur 4.2.

In Figuur 4.4 is het verschil in jaarlijkse seismische dreiging tussen een koud en gemiddeld temperatuurverloop weergegeven voor gasjaar 2021/2022.

## GY2021/2022 - Sa[0.01] - 475.0 year return period



Figuur 4.4 Absolute verschil in jaarlijkse seismische dreiging bij een herhalingsjijd van 475 jaar tussen een koud en een gemiddeld temperatuurverloop voor gasjaar 2021/2022.

## 5 Risicoanalyse

Dit hoofdstuk bevat de resultaten van de seismische risicoanalyse volgens de uitgangspunten, invoergegevens en modelversies uit Hoofdstuk 2. TNO gebruikt in deze publieke SDRA Groningen 2021 als risicomaat het Plaatsgebonden Persoonlijk Risico (*Local Personal Risk – LPR*), zie sectie 2.6. Sectie 5.1 behandelt de verdeling van het LPR over de Gebouwendatabase. Sectie 5.2 bevat een gevoeligheidsanalyse van de verschillende factoren in de beslisboom die bijdragen aan het risico.

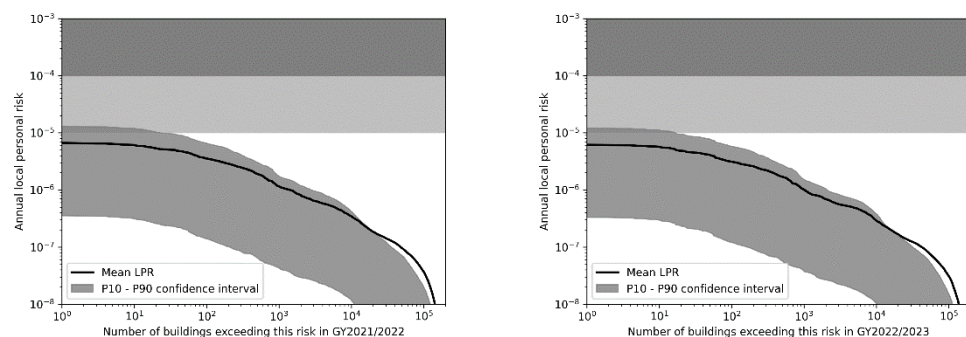
De risicoresultaten in dit hoofdstuk zijn weergegeven in gasjaren en zijn gebaseerd op de operationele strategie voorgesteld door NAM op basis van het productieniveau volgens de GTS-raming 2021 voor een gemiddeld temperatuurverloop (sectie 5.1) en voor een koude winter temperatuurverloop (sectie 5.3). De risicoresultaten voor kalenderjaren zijn weergegeven in Appendix C.

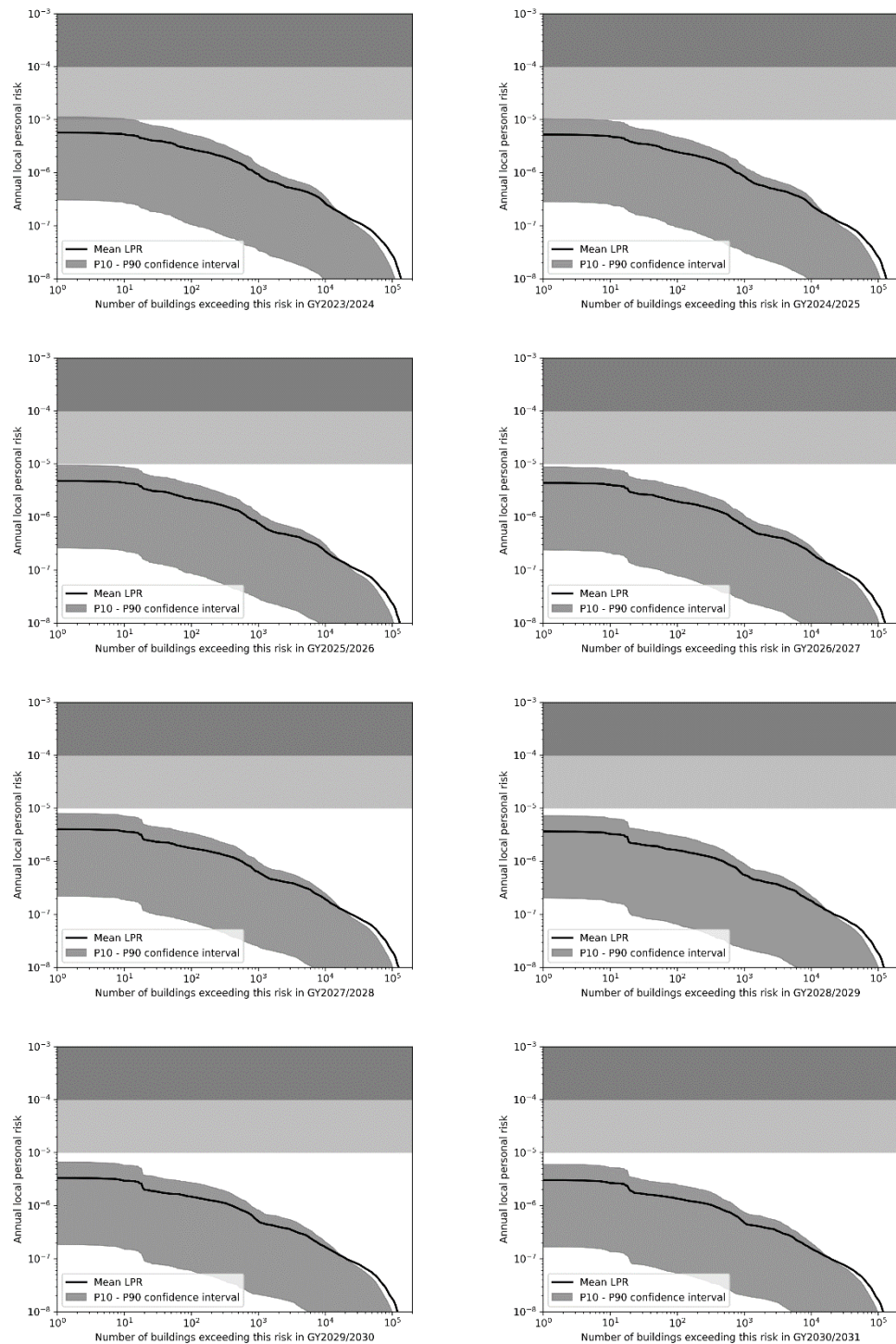
Appendix E geeft een uitsplitsing (disaggregatie) weer van de herkomst van het seismische risico voor geselecteerde geografische locaties naar de bijdragen van de variabelen magnitude, breukafstand en gemiddeld spectrale versnelling. Appendix E toont ook de ruimtelijke verdeling van de bijdragen aan het seismische risico per disaggregatievariabele.

### 5.1 Risicoverdeling over de Gebouwendatabase

Figuur 5.1 toont het aantal gebouwen dat een jaarlijkse verwachtingswaarde (mean) van de LPR overschrijdt voor het gasjaar 2021/2022 tot en met gasjaar 2030/2031, gebaseerd op een jaar met gemiddeld temperatuurverloop. De grijze band in de LPR-grafieken geeft een onzekerheidsbereik aan.

Vergelijkbaar met Figuur 5.1 toont Figuur C.1 in Appendix C het aantal gebouwen dat een jaarlijkse gemiddelde verwachtingswaarde van de LPR overschrijdt voor kalenderjaar 2021 tot en met kalenderjaar 2030, gebaseerd op een gemiddeld temperatuurjaar.





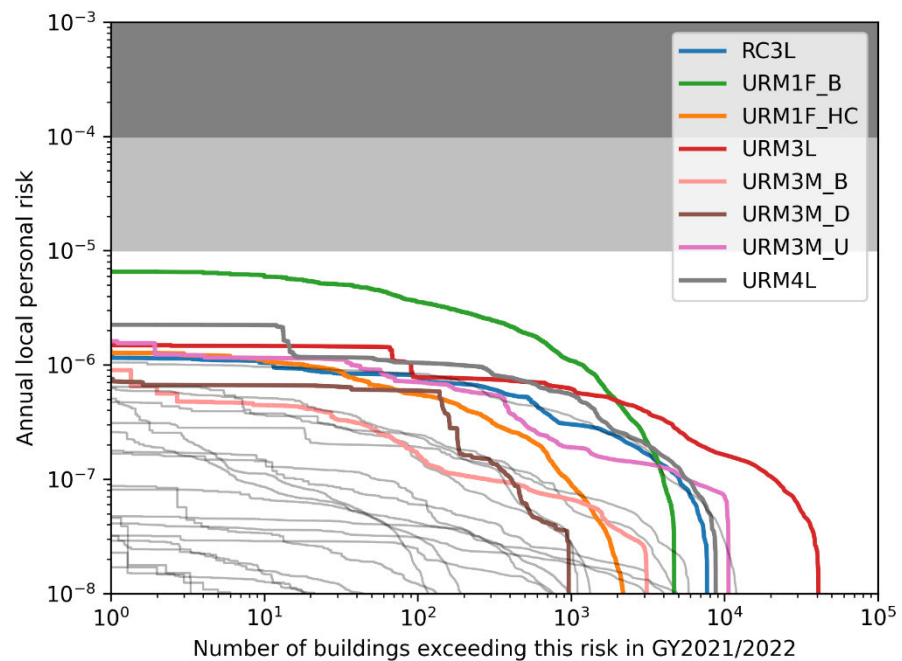
Figuur 5.1 LPR grafieken voor de gasjaren 2021/2022 tot en met 2030/2031 met een gemiddeld temperatuurverloop. Op de horizontale as staat het aantal gebouwen; op de verticale as de LPR. De grafieken geven voor elk aantal op horizontale as de LPR waarde die door deze groep overschreden wordt. De dikke zwarte lijn geeft de verwachtingswaarde (mean) van de LPR aan. De donkergrijze banden geven de spreiding in de beslisboom voor modelonzekerheden weer voor een betrouwbaarheidsinterval van tussen percentielen P10 en P90. De twee horizontale

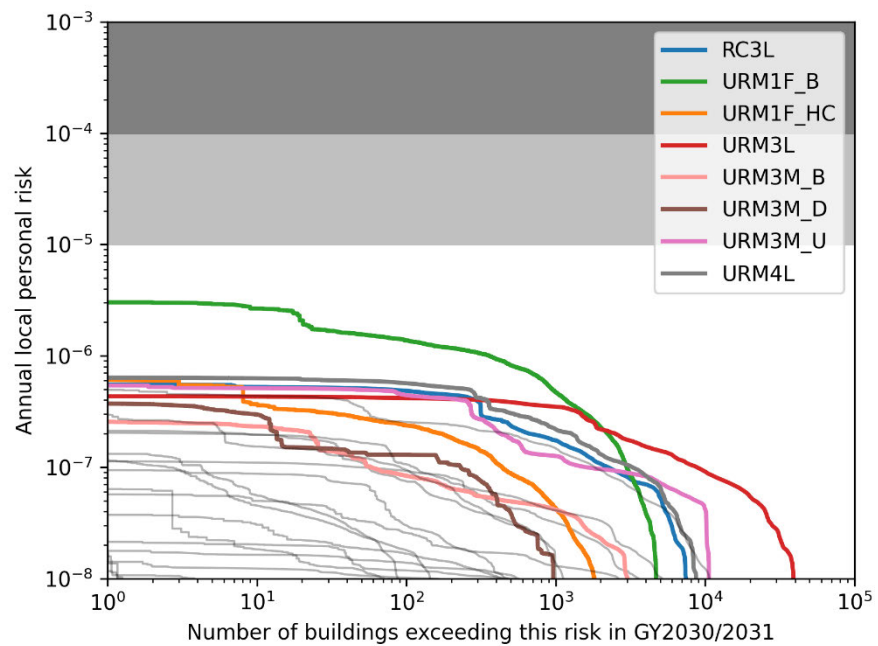
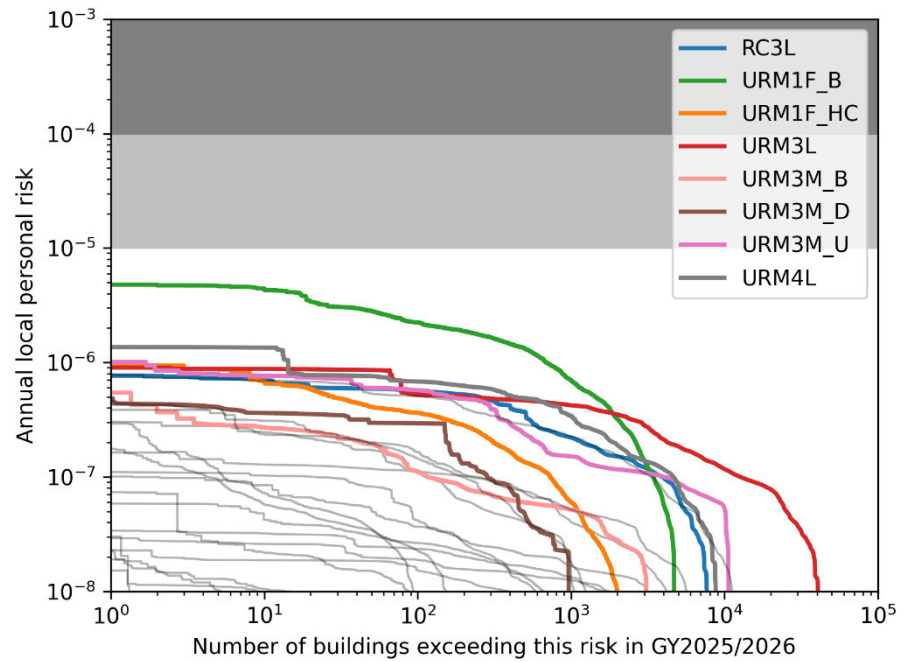
vlakken in lichtgrijs geven het tijdelijke ( $10^{-4}$ ) en permanente ( $10^{-5}$ ) LPR-niveau van de Meijdamnorm aan.

Figuur 5.2 toont dat alle gebouwen in het aardbevingsgebied volgens de voorgeschreven modellen aan de Meijdamnorm voldoen: de verwachtingswaarde van het risico voor alle gebouwen van alle typologieën is aanzienlijk lager dan  $10^{-5}$  per jaar. Het schuurgedeelte van een boerderij (type URM1F\_B) is het meest kwetsbaar (groene curve in Figuur 5.2). De huisdelen van deze boerderijen (type URM1F\_HC (oranje curve in Figuur 5.2) en type URM1F\_HA) zijn veel minder kwetsbaar.

Typologieën URM3L en URM4L zijn gemetselde rijtjeshuizen met spouwmuren en betonnen vloeren. Het verschil tussen deze typen is het percentage openingen in de gevelwanden op de begane grond, waarbij URM4L grotere openingen heeft en het kwetsbaardere type is. Voor alle bouwtypologieën neemt het verwachte seismisch risico jaarlijks af.

Vergelijkbaar met Figuur 5.2 voor gasjaren toont Figuur C.2 in Appendix C de verwachtingswaarde van het risico per kalenderjaar voor een geselecteerd aantal typologieën.





Figuur 5.2 LPR grafieken voor gasjaren 2021/2022 (boven), 2025/2026 (midden) en 2030/2031 (onder) met een gemiddeld temperatuurverloop. De interpretatie van de curves is vergelijkbaar met die in Figuur 5.1, echter nu met een aparte curve voor de verwachtingswaarde voor elke typologie. De gekleurde curves zijn apart benoemd in de legenda.

In Tabel 5.1 zijn zowel voor de verwachtingswaarde als voor P90 het aantal gebouwen weergegeven dat per gasjaar niet aan de Meijdamnorm voldoet. Een vergelijkbare tabel voor kalenderjaren is gegeven in Tabel C.1 in Appendix C.



Tabel 5.1 Het aantal gebouwen per gasjaar waarvoor de verwachtingswaarde (en de afwijkende risicomaat P90) van de LPR niet aan de Meijdamnorm voldoet volgens een gemiddeld temperatuurverloop.

	Mean LPR 1e-4	Mean LPR 1e-5	P90 LPR 1e-4	P90 LPR 1e-5
GY2021/2022	0	0	0	22
GY2022/2023	0	0	0	16
GY2023/2024	0	0	0	10
GY2024/2025	0	0	0	4
GY2025/2026	0	0	0	0
GY2026/2027	0	0	0	0
GY2027/2028	0	0	0	0
GY2028/2029	0	0	0	0
GY2029/2030	0	0	0	0
GY2030/2031	0	0	0	0

## 5.2 Analyse van epistemische onzekerheden

De TNO Modelketen Groningen is een probabilistisch model dat tot doel heeft onzekerheden zoveel mogelijk in rekenschap te nemen (TNO, 2019).

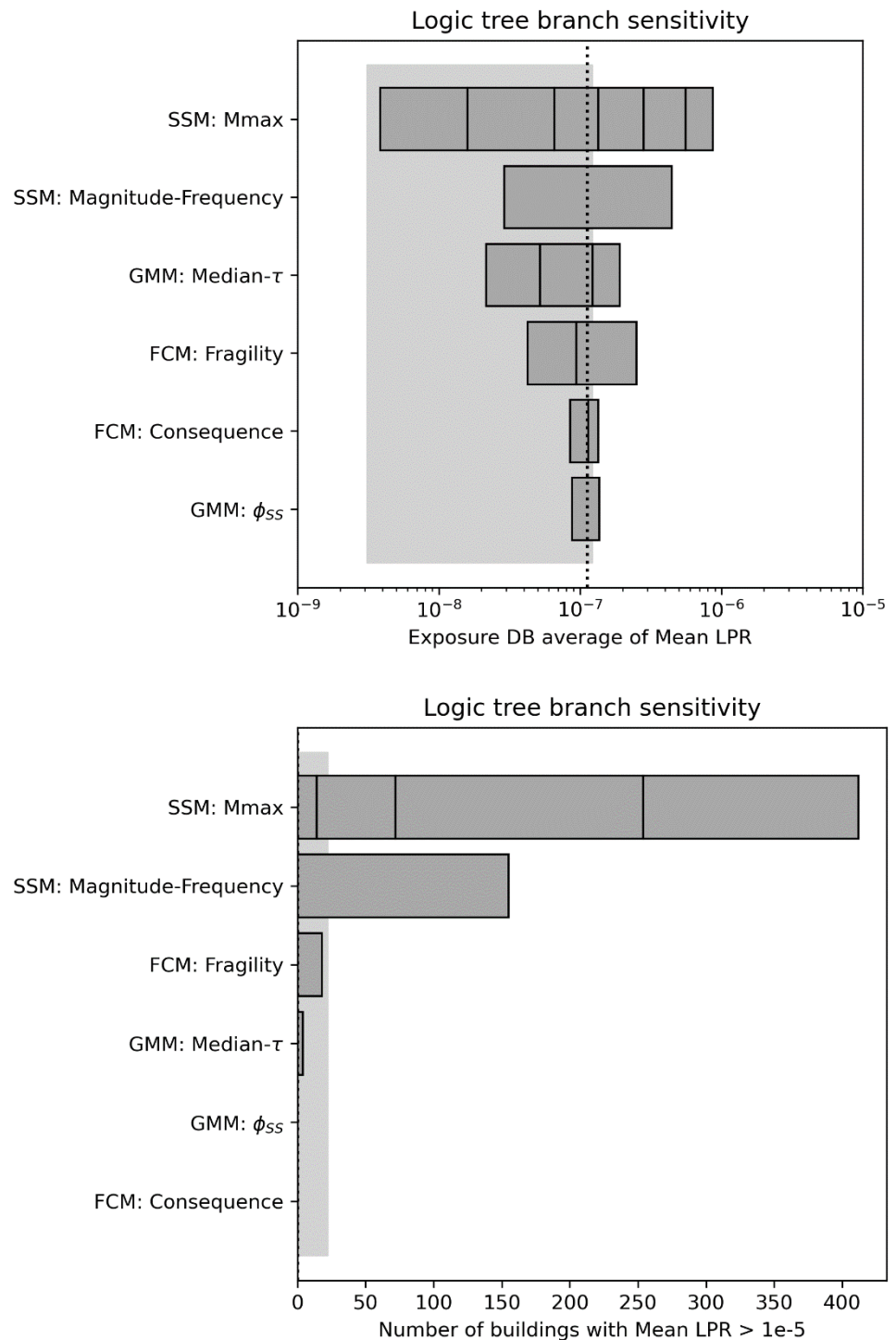
De totale verdeling van combinaties van alternatieve modellen (de aparte takken van de vertakkingsniveaus) karakteriseert het gezamenlijk bereik van epistemische onzekerheden. De intentie is niet zozeer om alle modelonzekerheden expliciet in de beslisboom op te nemen, maar wel om de totale epistemische onzekerheid te representeren. Om de gevoeligheid van risicovoorspellingen ten aanzien van elk vertakkingsniveau in de beslisboom in kaart te brengen presenteren we de resultaten van een gevoeligheidsanalyse in Figuur 5.3. Een aanvullende gevoeligheidsanalyse voor enkele modelkeuzes die niet in de beslisboom zijn opgenomen volgt in Hoofdstuk 7.

De potentiële bijdrage van het spanningsafhankelijke *beta*-model in de magnitude-frequentieverdeling ( $MF-\beta$ , bovenste tak van het linker vertakkingsniveau in Figuur 2.1) wordt bijvoorbeeld gemeten als het gewogen gemiddelde van alle beslisboomtakken die de bovenste tak van het magnitude-frequentiemodel omvatten, opnieuw gewogen door de relatieve gewichten van deze geselecteerde takken. Evenzo wordt de potentiële bijdrage van het spanningsafhankelijke *zeta*-model in het magnitude-frequentiemodel ( $MF-\zeta$ , onderste tak van het linker vertakkingsniveau in Figuur 2.1) berekend uit alle beslisboomtakken die de onderste tak van dit vertakkingsniveau bevatten.

Het herhalen van deze procedure voor alle risicofactoren en alle takken levert een zogenoemde tornado-plot op van afzonderlijke gevoeligheden voor epistemische onzekerheden. Zo kan voor elke risicofactor en elke tak afzonderlijk het potentiële risico worden berekend wanneer slechts voor dit vertakkingsniveau en deze tak gekozen zou worden.

Figuur 5.3 toont resultaten van de gevoeligheid van de afzonderlijke variabelen aan de verwachtingswaarde van het LPR. De spreiding van de alternatieven in de  $M_{\max}$ -verdeling is het grootst, gevolgd door de keuze in het magnitude-frequentiemodel. Het reduceren van onzekerheid levert doorgaans het meeste resultaat op voor de vertakkingsniveaus die de grootste spreiding laten zien in de gevoeligheidsanalyse. Uit Figuur 5.3 volgt dat de verbetering van de kennis omtrent het seismologisch

bronmodel kan leiden tot het verminderen van de epistemische onzekerheden (TNO, 2021).



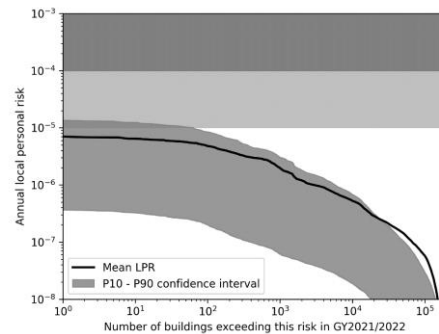
Figuur 5.3 Gevoeligheid van het seismisch risico voor epistemische onzekerheden binnen de beslisboom. De bovenste figuur geeft de gevoeligheid van de over de gehele gebouwendatabase gemiddelde LPR, voor elk modelalternatief per afzonderlijk vertakkingsniveau. De onderste figuur geeft op vergelijkbare wijze de gevoeligheid van het totale aantal gebouwen met een verwachtingswaarde (mean) van de LPR van



meer dan  $10^{-5}$  per jaar.. Elk verticaal streepje op een grijze balk beschrijft het eindresultaat bij keuze van één enkel alternatief in de betreffende boomvertakking. Het lichtgrijze gebied op de achtergrond bestrijkt het P10-P90 interval van de volledige beslisboom. Data voor gasjaar 2021/2022, voor een gemiddeld temperatuurverloop.

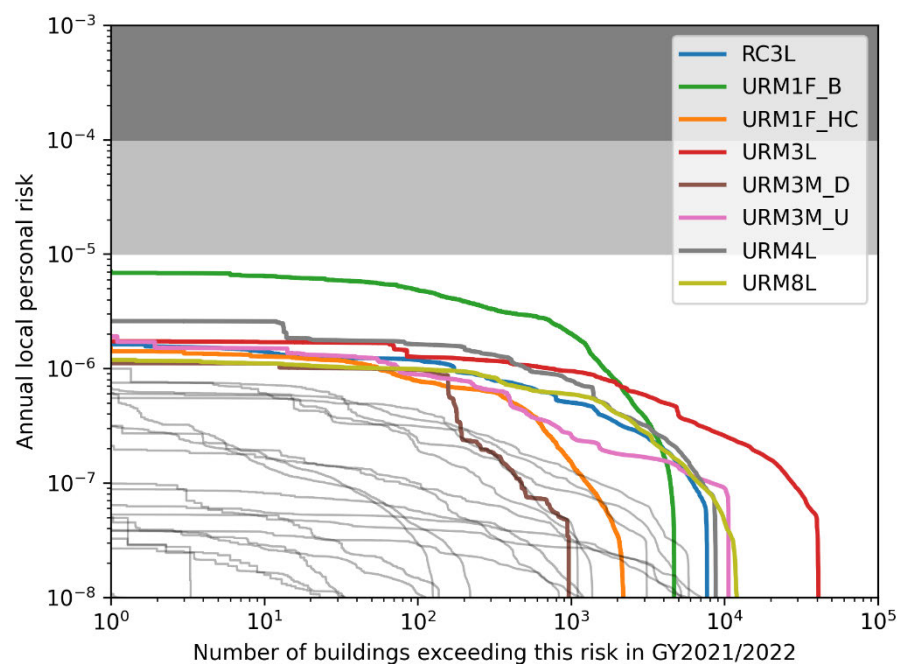
### 5.3 Risico koud temperatuurverloop

Vergelijkbaar met Figuur 5.1 voor een gemiddeld temperatuurverloop is de verwachtingswaarde van het totale seismisch risico in Figuur 5.4 weergegeven voor een koud temperatuurverloop voor gasjaar 2021/2022.



Figuur 5.4 LPR grafiek voor gasjaar 2021/2022 met een koud temperatuurverloop. Onderschrift als in Figuur 5.1.

Vergelijkbaar met Figuur 5.2 voor een gemiddeld temperatuurverloop is het seismisch risico voor de geselecteerde typologieën in Figuur 5.5 weergegeven voor een koud temperatuurverloop voor gasjaar 2021/2022.



Figuur 5.5 LPR grafieken voor gasjaar 2021/2022 met een koud temperatuurverloop per typologie. De gekleurde curven geven voor de geselecteerde typologieën de verwachtingswaarden van de LPR aan. Onderschrift als in Figuur 5.2.

Vergelijkbaar met Tabel 5.1 voor een gemiddeld temperatuurverloop zijn in Tabel 5.2 voor een koud temperatuurverloop voor zowel verwachtingswaarde als P90 het aantal gebouwen weergegeven dat in gasjaar 2021/2022 niet aan de Meijdamnorm voldoet.

Tabel 5.2 Het aantal gebouwen dat in gasjaar 2021/2022 volgens verwachtingswaarde (mean) of P90 niet aan de Meijdamnorm voldoet bij een koud temperatuurverloop.

	Mean LPR 1e-4	Mean LPR 1e-5	P90 LPR 1e-4	P90 LPR 1e-5
GY2021/2022	0	0	0	63

## 6 Schadeanalyse

### 6.1 Schadetoestand bewoonde gebouwen

Het document EMS-98 (*European Seismological Commission, 1998*) geeft richtlijnen voor het schatten van de intensiteit van een aardbeving op basis van de schadebeoordeling van gebouwen, zoals ook gebruikt door NAM (2020).

Schade aan gebouwen wordt beoordeeld op basis van een schade classificatie. Dit is bepaald voor twee hoofdcategorieën: gebouwen met ongewapend metselwerk (*Unreinforced masonry - URM*) en gebouwen met gewapend beton (*Reinforced Concrete - RC*). Voor beide hoofdcategorieën bestaat een kwalitatieve beschrijving van de schadetoestanden (*Damage State – DS*) in vijf gradaties van schade (NAM, 2020). Zo wordt "verwaarloosbare tot lichte schade" DS1 genoemd, "matige schade" DS2, "substantiële tot zware schade" DS3. De EMS-schaal relateert DS1 aan "haarscheurtjes in zeer weinig muren", DS2 met "scheuren in veel muren" en DS3 tot "grote en uitgebreide scheuren in de meeste muren" (NAM, 2020).

### 6.2 Verwerking externe invoergegevens

De Gebouwendatabase (*Exposure Database - EDB V7.1*) is een extractie van een projectdatabase en omvat de typologieclassificaties van de gebouwen in het aardbevingsgebied per gebouw. Naast het gebruik als input in de risicoanalyse (Hoofdstuk 5), levert de Gebouwendatabase ook de nodige informatie om de typologieën toe te kennen aan zo'n 157 duizend gebouwen ("Basisregistratie Adressen en Gebouwen (BAG)" van het Kadaster) in het schadeprognose gebied.

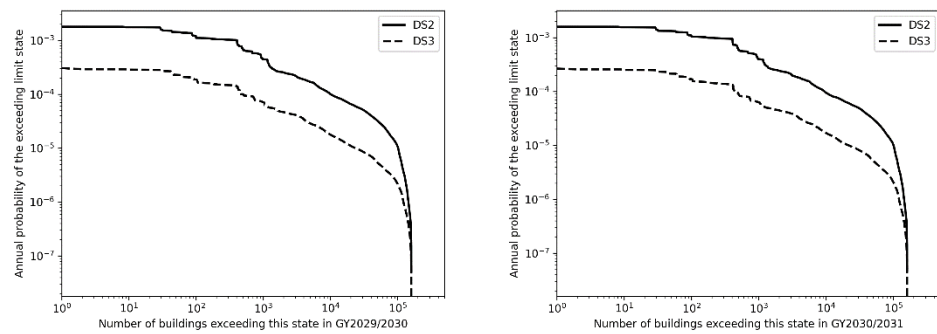
Ten opzichte van eerder databaseversies zijn de schuren, garages en andere kleine, doorgaans leegstaande gebouwen verwijderd. Deze (onbewoonde) gebouwen zijn uitgesloten van de schadeprognose omdat er geen schadegegevens en/of rapporten beschikbaar zijn voor dergelijke constructies (NAM, 2020). Het aandachtsgebied is hetzelfde voor de dreigingsanalyse en voor de risicoanalyse en is gebaseerd op de omtrek van het Groningen gasveld. De extractiegrens voor de EDB V7.1 is een buffer van 5 km rond de omtrek van het gasveld (NAM, 2020).

### 6.3 Voorspelling schadetoestand 2 (DS2) en schadetoestand 3 (DS3)

Kwetsbaarheidsfuncties voor schadetoestanden DS2 en DS3 zijn ontwikkeld voor elke typologie die in de Gebouwendatabase is geïdentificeerd met behulp van een uitgebreide analytische modellering en experimentele testcampagnes (NAM, 2020).

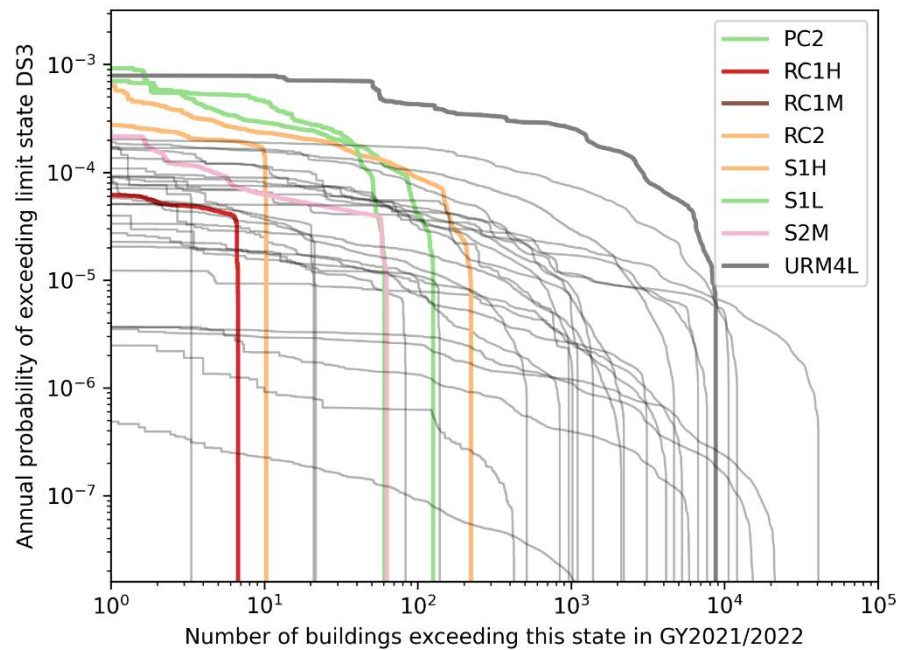
Figuur 6.1 toont de resultaten van de schadeprognose voor schadetoestanden DS2 en DS3 voor alle typologieën in de vorm van een jaarlijkse overschrijdingskans van die schadetoestand voor gasjaar 2021/2022 tot en met gasjaar 2030/2031.

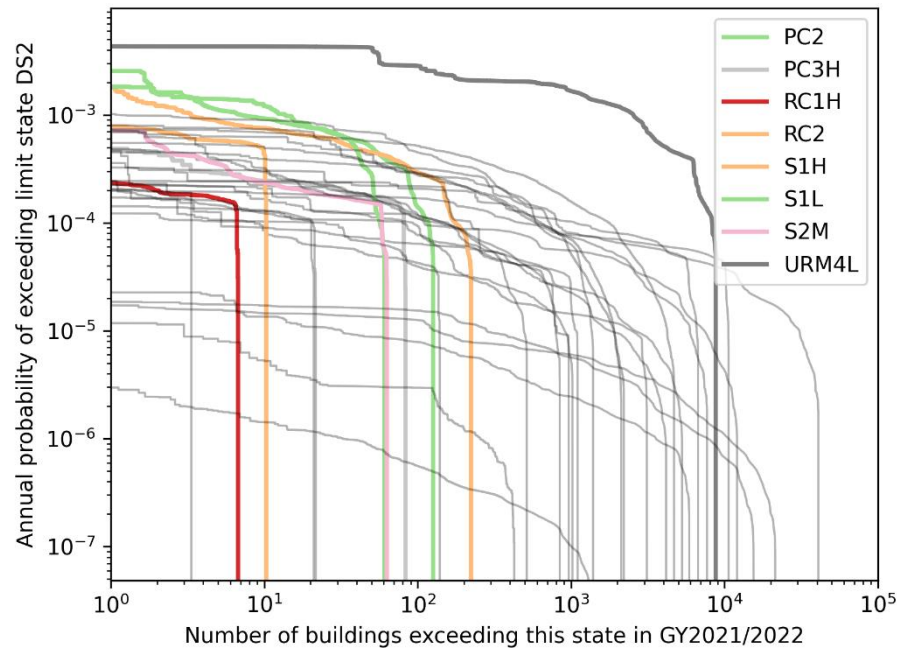




Figuur 6.1 Jaarlijkse overschrijdingskans voor schadetoestand DS2 (doorgetrokken curve) en schadetoestand DS3 (onderbroken curve) voor gasjaar 2021/2022 tot en met gasjaar 2030/2031 voor alle gebouwen bij een gemiddeld temperatuurverloop.

Figuur 6.2 toont de resultaten van de schadeprognose DS2 en DS3 voor verschillende typologieën in de vorm van een jaarlijkse overschrijdingskans van die schadetoestand voor gasjaar 2021/2022. De figuur laat bijvoorbeeld zien dat in gasjaar 2021/2022 minder dan vijftig panden een kans van 0.5% op DS2 schadetoestand hebben. Voor schadetoestand DS3 is deze kans minder dan 0.1%.

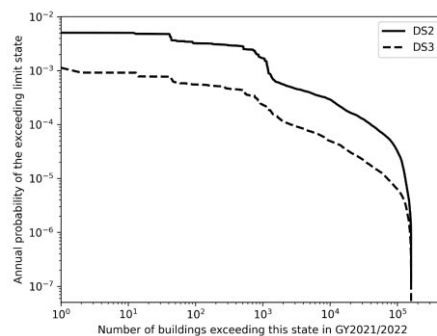




Figuur 6.2 Jaarlijkse overschrijdingskans voor schadetoestand DS2 (boven) en schadetoestand DS3 (onder) voor gasjaar 2021/2022 voor een aantal typologieën voor een gemiddeld temperatuurverloop.

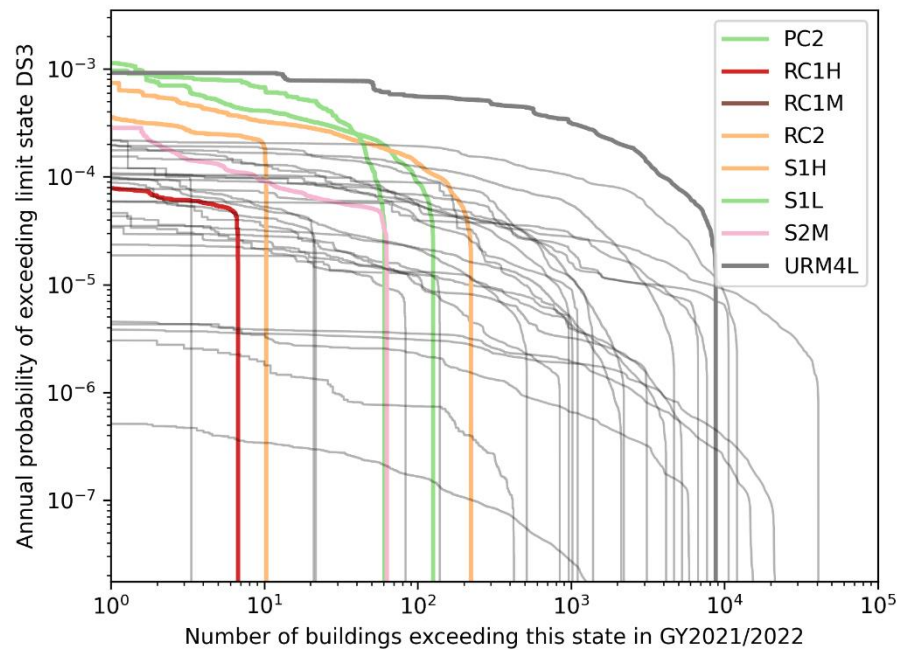
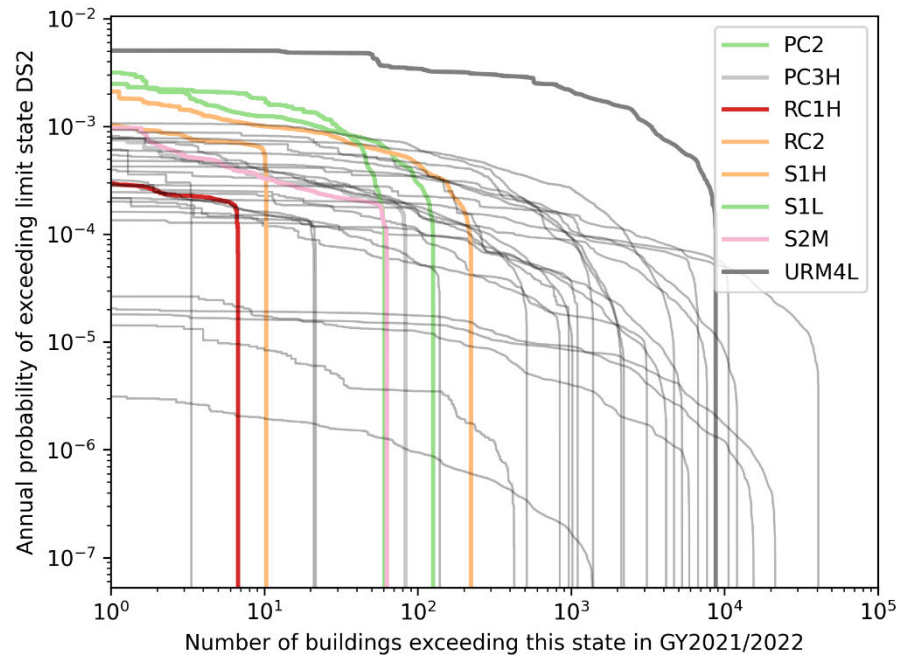
#### 6.4 Schadeprognose koud temperatuurverloop

Vergelijkbaar met Figuur 6.1 voor een gemiddeld temperatuurverloop toont Figuur 6.3 de resultaten van de schadeprognose voor schadetoestanden DS2 en DS3 voor een koud temperatuurverloop voor alle typologieën in de vorm van een jaarlijkse overschrijdingskans van die schadetoestand voor gasjaar 2021/2022.



Figuur 6.3 Jaarlijkse overschrijdingskans voor schadetoestand DS2 (doorgetrokken curve) en schadetoestand DS3 (onderbroken curve) voor gasjaar 2021/2022 voor alle typologieën voor een koud temperatuurverloop. Onderschrift als in Figuur 6.1

Vergelijkbaar met Figuur 6.2 voor een gemiddeld temperatuurverloop toont Figuur 6.4 de resultaten van de schadeprognose DS2 en DS3 voor verschillende typologieën voor een koud temperatuurverloop in de vorm van een jaarlijkse overschrijdingskans van die schadetoestand voor gasjaar 2021/2022.



Figuur 6.4 Jaarlijkse overschrijdingskans voor schadetoestand DS2 (boven) en schadetoestand DS3 (onder) voor gasjaar 2021/2022 voor een aantal typologieën voor een koud temperatuurverloop.

## 7 Discussie

In dit hoofdstuk geven we nadere toelichting op de resultaten van de SDRA 2021 als gerapporteerd in de Hoofdstukken 2 tot en met 6 door deze voor het gasjaar 2021/2022 te vergelijken met de HRA 2020. Dit wordt besproken in sectie 7.1 en 7.2. Aanvullend is er een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd op basis van eerdere TNO aanbevelingen. Sectie 7.3 geeft een samenvatting van de uitgangspunten voor de gevoeligheidsanalyse. In sectie 7.4 bespreken we componentsgewijs de resultaten van deze analyse.

### 7.1 Wijzigingen SDRA 2021 ten opzichte van HRA 2020

Ten opzichte van de HRA 2020 zijn de wijzigingen samen te vatten in een vijftal punten:

1. Uitvoering door de Modelketen Groningen van TNO
2. Geactualiseerde operationele strategie
3. Hernieuwde kalibratie van het SSM
4. Wijziging van het period-to-period correlatiemodel van het GMM
5. Actualisatie van de gebouwendatabase

Deze punten lichten we kort toe.

#### *Ad 1.) Uitvoering door de Modelketen Groningen van TNO*

De TNO Modelketen Groningen is een onafhankelijke implementatie van de modellen die ten grondslag liggen aan de HRA 2020 van NAM. In twee vergelijkingsrapporten (TNO, 2019; 2020g) heeft TNO aangetoond met een alternatieve rekenmethode op basis van numerieke integratie de NAM resultaten nauwkeurig te kunnen reproduceren. In het vervolg van dit rapport duiden we de TNO reproductie van de HRA 2020 resultaten eenvoudig aan als de HRA 2020.

#### *Ad 2.) Geactualiseerde operationele strategie*

Elk jaar worden één of meerdere operationele strategieën voor de Groningen gasproductie gemaakt, mede op basis van de raming van GTS. De raming voor gasjaar 2021/2022 is naar boven bijgesteld (3.9 miljard Nm<sup>3</sup>) ten opzichte van de raming van februari 2020 (3.1 miljard Nm<sup>3</sup>) voor datzelfde gasjaar (GTS, 2021). Echter, de gerealiseerde productie over het kalenderjaar 2020 is iets lager dan geraamd. De operationele strategie is daarop door de NAM aangepast.

#### *Ad 3.) Hernieuwde kalibratie van het SSM*

Volgens opdracht heeft NAM het SSM gekalibreerd op basis van de aardbevingscatalogus (KNMI, 2021) tot en met 31 december 2020. De HRA 2020 is uitgevoerd met een eerdere kalibratie op basis van de aardbevingscatalogus tot en met 31 december 2018.

#### *Ad 4.) Wijziging period-to-period correlatie model van het GMM*

Bij het vergelijken van de implementaties van TNO en NAM is gebleken dat er onduidelijkheid bestond over één aspect van het GMM, te weten de period-to-period correlatiestructuur van het site-responsemodel. De originele modeldocumentatie (Bommer et al., 2019) bleek intern niet consistent op dit punt. Na consultatie heeft NAM de period-to-period correlatiestructuur binnen het site-



responsemodel verwijderd, en volgt daarmee de intentie van de modelontwikkelaars. Dit is een wijziging ten opzichte van de HRA 2020.

#### *Ad 5.) Actualisatie van de gebouwendatabase*

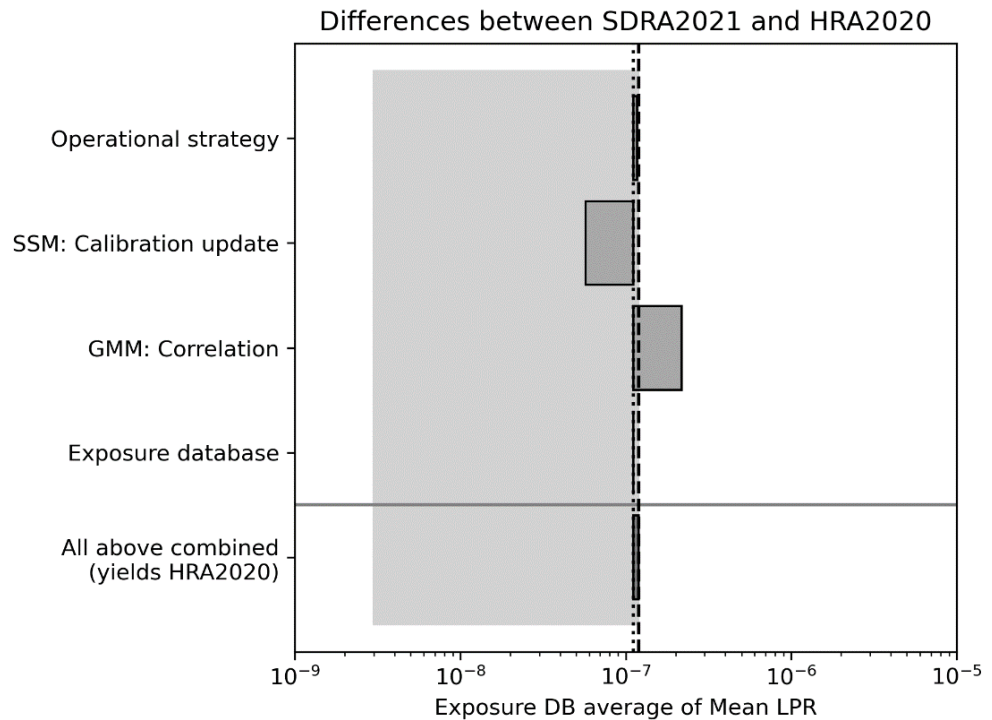
Ten behoeve van de SDRA 2021 is door NAM een update van de Gebouwendatabase met versienummer V7.1 aangeleverd. Volgens de bijgeleverde *Cover Note* betreft het onder andere een actualisatie van openbare gegevensbestanden als het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN3) en de Basisregistratie Adressen en Gebouwen (BAG).

## **7.2 Verschillen tussen SDRA 2021 en HRA 2020**

Hier worden de verschillen tussen SDRA 2021 en HRA 2020 gepresenteerd per onderdeel (cf. sectie 7.1). De resultaten zijn berekend op basis van het gemiddelde temperatuurscenario.

Om de impact van de (model)wijzigingen op het risico inzichtelijk te maken is in Figuur 7.1 het gemiddelde risico over alle panden in de gebouwendatabase weergegeven in een vergelijking van SDRA2021 met HRA2020. Telkens is één van de wijzigingen/verschillen in modelkeuzes als benoemd in secties 7.1 toegepast om zo de individuele invloed van deze keuzes te kunnen beoordelen. Ter referentie is ook van SDRA2021 de spreiding in de epistemische onzekerheid weergegeven als de band tussen het 10<sup>e</sup> en 90<sup>e</sup> percentiel (P10-P90).

In Figuur 7.1 is te zien dat de gemiddelde LPR waarde in de SDRA2021 een fractie lager ligt dan in de HRA2020. Ook is te zien dat indien de SDRA2021 uitgevoerd zou zijn met de kalibratiefiles van HRA2020, het gemiddelde risico significant lager zou zijn. Als de SDRA2021 uitgevoerd zou zijn met dezelfde keuzes voor de period-to-period correlatiestructuur ("GMM: Correlation") als in de HRA2020, zou het gemiddelde risico juist hoger zijn. Het bijstellen van de operationele strategie en de update van de Gebouwendatabase hebben weinig impact op de gemiddelde LPR waarde.



Figuur 7.1 Vergelijking van het LPR per gebouw gemiddeld over de gehele gebouwendatabase (de gebouwen die zowel in Gebouwendatabase V7 als V7.1 voorkomen). De twee verticale onderbroken lijnen geven voor beide modelketenrealisaties de gemiddelde waarde van LPR aan: de SDRA2021 met stippen links, de HRA2020 met strepen rechts. De P10-P90 bandbreedte die voortkomt uit de beslisboom (logic tree) van de SDRA2021 wordt weergegeven als een grijze band. Langs de verticale as staan wijzigingen weergegeven. Deze wijziging wordt steeds toegepast ten opzichte van de SDRA2021, en wordt met een horizontale balk aangegeven wat het effect op de gemiddelde LPR waarde is. Bijvoorbeeld: als de SDRA2021 de period-to-period correlatiestructuur zou gebruiken van de HRA2020 zou de gemiddelde LPR waarde van de SDRA2021 hoger uitvallen ("GMM: Correlation").

De verwachte gaswinning voor het gasjaar 2021/2022 is licht bijgesteld ten opzichte van de operationele strategie die ten grondslag ligt aan de HRA 2020 (EZK, 2021b). De ontwikkeling en de ruimtelijke verdeling van de seismiciteit is zeer vergelijkbaar. Ook het totaal aantal verwachte aardbevingen van magnitude M1,5 en hoger is zeer vergelijkbaar.

Opvallend is, dat in vergelijking met de HRA2020, de SDRA2021 resulteert in significant hogere overschrijdingskansen voor zwaardere aardbevingen (Tabel 7.1). Dit is het gevolg van een nieuwe kalibratie van het bronmodel door NAM.

De verhoging van het aantal hogere magnitudes werkt door in de dreigingskaarten. Zo valt de maximale piekgrondversnelling ( $PGA_{max}$ ) voor gasjaar 2021/2022 in de SDRA2021 met 0.13g hoger uit dan de 0.11g voor hetzelfde gasjaar in de HRA2020. Er is dus sprake van een hogere inschatting van de dreiging. Aangezien keuzes rond het period-to-period correlatiemodel geen effect hebben op de dreigingskaarten, zijn alle verschillen in de dreigingskaarten direct te relateren aan verschillen in het SSM.

Tabel 7.1 Verwachting voor gasjaar 2021/2022 van het aantal bevingen met magnitude groter dan of gelijk aan M1.5 ("Rate"), overschrijdingskansen voor een aantal geselecteerde magnitudes en maximale piekgrondversnelling ( $PGA_{max}$ ) voor een gemiddeld temperatuurverloop.

	Rate	$M \geq 3.5$	$M \geq 3.6$	$M \geq 4.0$	$M \geq 4.5$	$M \geq 5.0$	$PGA_{max}$
HRA2020	5.92	4.56%	3.39%	0.90%	0.11%	0.02%	0.11g
SDRA2021	5.64	6.78%	5.15%	1.46%	0.20%	0.03%	0.13g

Tenslotte kan het risico worden vergeleken (Tabel 7.2). Allereerst is te zien dat het aantal panden dat de Meijdamnorm overschrijdt in zowel HRA2020 als SDRA2021 gelijk nul is. Ondanks de toegenomen dreiging daalt het aantal panden in de P90 groep licht: van 53 naar 22. Dit komt grotendeels door de veranderde keuze met betrekking tot de period-to-period correlatiestructuur in het GMM. Dit resulteert in een sterke daling van het risico die de toegenomen dreiging compenseert.

Tabel 7.2 Vergelijking van het aantal overschrijdingen van de Meijdamnorm die resulteren uit de verschillende keuzes en uitgangspunten tussen HRA2020 en SDRA2021.

Gasjaar 2021/2022	Aantal panden met gemiddeld $LPR \geq 10^{-5}$	Aantal panden met P90 $LPR \geq 10^{-5}$
HRA2020	0	53
SDRA2021	0	22

### 7.3 Uitgangspunten gevoeligheidsanalyse

In sectie 5.2 is de gevoeligheid gepresenteerd van de onzekerheden die opgenomen zijn in de beslisboom van de SDRA 2021. In deze sectie wordt een aanvullende gevoeligheidsanalyse beschreven voor modelkeuzes die buiten de huidige beslisboom vallen.

In het door EZK ingerichte proces om tot een keuze voor modelversies te komen heeft TNO in oktober 2020 in het Statusrapport (TNO, 2020c) een advies uitgebracht over de te gebruiken modellen in de SDRA 2021. De in dat advies geformuleerde aanbevelingen zijn in de meeste gevallen niet het gevolg van nieuw ontwikkelde modellen en inzichten van de kant van TNO, maar van een zorgvuldige beoordeling van de door de NAM voorgestelde modelwijzigingen ten behoeve van de HRA 2020. Die beoordeling heeft in specifieke gevallen geleid tot afwijzing van die NAM voorstellen. Een gemene deler in de beoordeling door TNO is dat de door NAM voorgestelde wijzigingen leiden tot een lagere inschatting van het seismisch risico, terwijl de wetenschappelijke onderbouwing daarvoor volgens TNO niet afdoende is (TNO, 2020d). Dit betekent in die gevallen een terugval naar eerdere modelversies.

Het feit dat niet alle aanbevelingen van TNO zijn overgenomen in de voorschriften voor de SDRA 2021 geeft aan dat er op deze punten geen wetenschappelijke consensus bestaat. De gevoeligheidsanalyse geeft een beeld van de impact van de gemaakte keuzes op het risico.

Op de volgende vier punten wijken de aanbevelingen af van de voorschriften voor de SDRA 2021:

1. Detailimplementatie en kalibratie van het SSM
2. Keuze van het magnitude-frequentiemodel binnen het SSM
3. Keuze van het period-to-period correlatiemodel binnen het GMM
4. Aanpassingen van het FCM

#### *Ad 1.) Detailimplementatie en kalibratie van het SSM*

Naast een directe replicatie van de NAM SSM code (sectie 7.1 - Ad 1) heeft TNO ervoor gekozen ook een eigen versie van het SSM te onderhouden (binnen de intentie van het door NAM ontworpen model) op basis van de in het openbaar beschikbare informatie. Hierbij zijn op detailniveau diverse implementatiekeuzes anders ingevuld dan bij de implementatie van NAM (bijvoorbeeld verschillen in de discretisatie van breuken).

De kalibratie van het SSM wordt door TNO beschouwd als een integraal onderdeel van de Modelketen Groningen, omdat deze kalibratie op regelmatige basis moet worden geactualiseerd. De TNO kalibratie is eveneens geïmplementeerd binnen de intentie van het door NAM ontworpen model en evenals de rest van de keten zowel inhoudelijk als programmeer-technisch extern beoordeeld (Tessella, 2020). Voor de kalibratie is de KNMI-catalogus van geïnduceerde aardbevingen (KNMI, 2021) als basis gebruikt over de periode 1 januari 1995 tot en met 31 december 2020.

Daarnaast heeft TNO een andere aanpak voor de bepaling van een drietal conditioneringsparameters binnen het SSM. NAM kiest in haar kalibratie een tweetal geoptimaliseerde realisaties voor gebruik in respectievelijk het seismische activiteitsmodel en het magnitude-frequentiemodel. TNO geeft de voorkeur aan het gebruik van een waarschijnlijkheidsverdeling voor deze conditioneringsparameters op basis van de kalibratie met de waarnemingen (TNO, 2020c). Hierdoor wordt aanvullend op de aanpak van NAM nu ook de onzekerheid in de keuze van deze conditioneringsparameters op probabilistische wijze meegenomen. Om het effect van deze implementatiekeuzes van het SSM en de kalibratie te onderzoeken is dit onderdeel van de gevoeligheidsanalyse.

#### *Ad 2.) Keuze van het magnitude-frequentiemodel binnen het SSM*

Ten behoeve van de HRA 2020 heeft NAM in versie V6 van het SSM een nieuw model voor de magnitude-frequentierelatie geïntroduceerd, het zogenaamde tapermodel. Het taper zorgt ervoor dat de waarschijnlijkheid van magnitudes voorbij een zekere kantelmagnitude exponentieel worden gedempt. Hierbij wordt tevens verondersteld dat de kantelmagnitude toeneemt met toenemende spanning. TNO (2020d) heeft aangetoond dat dit frequentie-magnitudemodel niet betrouwbaar kan worden gekalibreerd op een aardbevingscatalogus van de omvang die beschikbaar is voor Groningen. Dit omdat de staart van de verdeling voor waarden die relevant zijn voor het seismisch risico niet voldoende bemonsterd is door de waarnemingen uit het verleden.

De kalibratie van het tapermodel op een te kleine dataset resulteert in een sterke voorkeur voor kantelmagnitudes in de directe nabijheid van de hoogst waargenomen magnitude die aanwezig is in de kalibratiedataset, in dit geval de M3,6 Huizinge beving.

De gangbare manier om met onzekerheid in de staart van de frequentie-magnitudeverdeling om te gaan is door schalingsrelatie van de kleinere aardbevingen, zoals afgeleid uit de observaties, te extrapoleren naar grotere magnitudes tot een bepaalde afkapwaarde  $M_{\max}$ . De waarde van  $M_{\max}$  is fundamenteel onzeker en is daarom opgenomen in de beslisboom van epistemische onzekerheden met waarden en gewichten bepaald door middel van een deskundigenraadpleging.

In feite geldt dezelfde overweging voor de kantelmagnitude en de veronderstelde spanningsafhankelijkheid. Ook deze kunnen niet betrouwbaar worden verkregen uit de waarnemingen en moeten daarom worden behandeld als epistemische onzekerheid, op een vergelijkbare manier als  $M_{max}$ . Omdat dit niet het geval is in het NAM SSM V6 model, wordt er door TNO gekozen om in de beslisboom de weging van het tapermodel een waarde van 0 toe te kennen, en dit model dus effectief uit te schakelen.

#### *Ad 3.) Keuze van het period-to-period correlatiemodel binnen het GMM*

Als eerder gememoreerd in Sectie 7.1 onder Ad 4.) is er discussie ontstaan over de toepassing van de period-to-period correlatiestructuur in het GMM. TNO heeft geconstateerd dat het ontbreken van de period-to-period correlatie in de site response ongewenst is (TNO, 2020c; 2020d). Ten eerste is het ontbreken van period-to-period correlatie in de site-response fysisch niet plausibel. Ten tweede leidt het achterwege laten van de period-to-period correlatie in de site response tot een incompatibiliteit tussen het grondbewegingsmodel en het kwetsbaarheidsmodel. Zelfs als het site response model zonder period-to-period correlatie voor Groningen een fysisch geschikt model zou blijken te zijn, dan zou het kwetsbaarheidsmodel daarvoor opnieuw moeten worden gekalibreerd. In de gevoeligheidsanalyse wordt daarom gekozen de period-to-period correlatiestructuur in het site responsemodel van het GMM wel toe te passen.

#### *Ad 4.) Aanpassingen aan het FCM*

De aanpassingen aan het Kwetsbaarheids- en Gevolgmodel (FCM) zijn gebaseerd op eerder TNO advies (TNO, 2020c; 2020d) en studies met betrekking tot het FCM in het typologieproject (TNO, 2020e; 2020f) onder toezicht en validatie van het Adviescollege Veiligheid Groningen (ACVG). De aanpassingen hebben onder andere betrekking op de modelonzekerheid, die TNO voor gebouwen van ongewapend metselwerk hoger inschat dan NAM. Een eerdere aanpassing van NAM bij de overgang van FCM V6 naar V7, waarbij voor een aantal typologieën van ongewapend metselwerk de modelonzekerheid nog slechts eenzijdig (in de veilige richting) werd toegekend, is daarbij ongedaan gemaakt. De door TNO toegekende modelonzekerheid is tweezijdig, zowel in veiliger als in onveiligere richting. Effectief leidt dit tot een lagere inschatting van de belastbaarheid van de betreffende typologieën.

De invloed van bovenstaande aanbevelingen zijn in kaart gebracht in de gevoeligheidsanalyse van sectie 7.4. De modelketenrealisatie op basis van alle bovenstaande aanbevelingen (1-4) gecombineerd wordt aangeduid met de afkorting GVA.

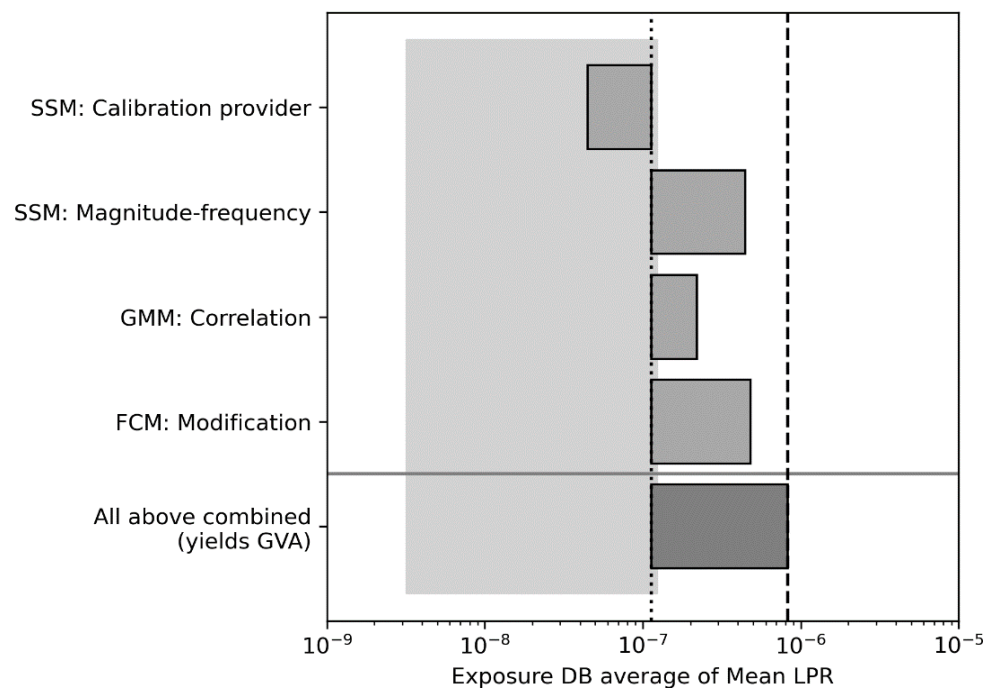
## **7.4 Resultaten gevoeligheidsanalyse**

Hier worden de resultaten van de gevoeligheidsanalyse gepresenteerd per onderdeel (cf. sectie 7.2) en ook in de combinatie van alle onderdelen. De resultaten zijn berekend op basis van het gemiddelde temperatuurscenario.

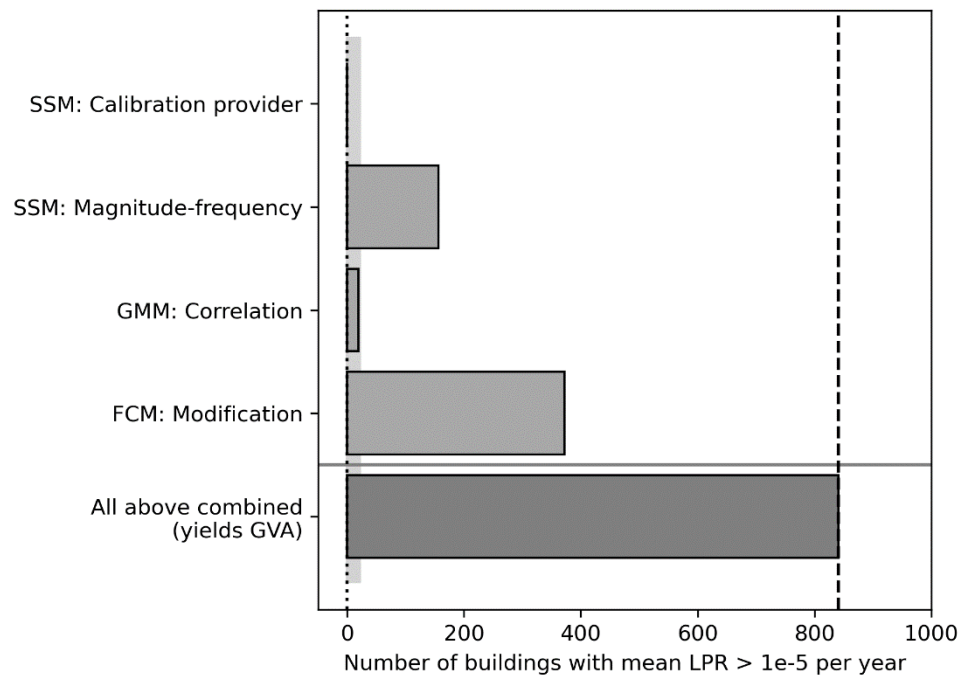
Om de impact van de verschillende keuzes op het risico inzichtelijk te maken is in Figuur 7.2 de gemiddelde LPR waarde over alle panden in de gebouwendatabase weergegeven ten opzichte van SDRA2021. In Figuur 7.3 is voor de verschillende

keuzes het aantal overschrijdingen van veiligheidsnorm weergegeven. Telkens is één van de wijzigingen/verschillen in modelkeuzes als benoemd in sectie 7.3 toegepast om zo de individuele invloed van deze keuzes te kunnen beoordelen. Ter referentie is ook van SDRA2021 de spreiding in de epistemische onzekerheid weergegeven als de band tussen het 10<sup>e</sup> en 90<sup>e</sup> percentiel (P10-P90).

In Figuur 7.2 is te zien dat de gemiddelde LPR waarde van de gecombineerde realisatie op basis van de aanbevelingen (GVA) hoger ligt dan in de SDRA2021. Ook is te zien dat de meeste keuzes binnen de gevoeligheidsanalyse leiden tot een significant hoger risico dan de keuzes van SDRA2021. De keuze voor de bronkalibratie door TNO leidt echter tot een lager risico dan de bronkalibratie door NAM (“SSM: Calibration provider”).



Figuur 7.2 Als Figuur 7.1, veranderingen ten opzichte van SDRA2021 worden weergegeven met grijze balken. De donkergrijze balk geeft het gecombineerde resultaat (GVA). De P10-P90 bandbreedte die voortkomt uit de beslisboom (logic tree) van de SDRA2021 wordt weergegeven als een licht grijze band.



Figuur 7.3 Verschil per afzonderlijke modelkeuze (en gecombineerd) ten opzichte van SDRA 2021 in het aantal panden dat niet voldoet aan de Meijdamnorm.

Uit de gevoeligheidsanalyse komt naar voren dat overschrijdingskansen voor hogere magnitudes significant verschillen bij gebruik van verschillende keuzes binnen het seismologisch model (kalibratie en frequentie-magnitudemodel). Enerzijds leidt een lagere  $b$ -waarde (richtingscoëfficiënt in de magnitudeverdeling) tot een lagere overschrijdingskans voor de lagere magnitudes. De afwijkende  $b$ -waarde is een uiting van de hernieuwde SSM kalibratie door NAM. De kalibratie door TNO laat dit effect niet zien. Anderzijds leidt het niet toepassen van het tapermodel tot een hogere overschrijdingskans voor hogere magnitudes. Het kantelpunt ligt rond de maximale magnitude in de kalibratiedataset (2012 Huizinge M3,6 beving). Dit is een eigenschap van het door NAM gebruikte model en kalibratiemethode.

Figuur 7.3 maakt ook duidelijk dat aanpassingen het Kwetsbaarheids- en Gevolgmodel (FMC) van aanzienlijke invloed zijn op het risico.

De combinatie van alle keuzes gemaakt in de gevoeligheidsanalyse (aangeduid als GVA) geeft een beeld van het effect op het seismisch risico.

Voor de GVA leidt dit tot 842 panden die niet aan de Meijdamnorm voldoen (Figuur F.1 in Appendix F). Dit zijn vrijwel allemaal aanpalende schuren als onderdeel van vrijstaande boerderijen (URM1F\_B). Of dit consequenties heeft voor de versterking is mede afhankelijk van de daadwerkelijke gebruiksfunctie van deze panden. De kleine resterende groep bestaat uit gemetselde rijtjeshuizen met spouwmuren en betonnen vloeren met grote gevelopeningen op de begaande grond (typologie URM3M, URM3L en URM4L). Het grote verschil in vergelijking met SDRA2021 is het directe resultaat van de aanbevelingen zoals beschreven in sectie 7.3.

## 7.5 Slotopmerkingen

De SDRA2021 geeft een wat hogere dreiging, maar een vergelijkbaar risico voor het gasjaar 2021/2022 ten opzichte van de HRA2020 voor datzelfde gasjaar. De oorzaak voor de hogere dreiging is hoofdzakelijk te vinden in de hernieuwde kalibratie van het bronmodel als aangeleverd door NAM. Het effect van de aangepaste raming van gasproductie is zeer beperkt. De verhoogde dreiging wordt ten aanzien van het seismisch risico gecompenseerd door het uitschakelen van de period-to-period correlatie in de site response binnen het GMM.

De gevoeligheidsanalyse laat zien dat de meeste modelaanbevelingen van TNO leiden tot een hogere kans op zwaardere bevingen. Dit uit zich in zowel de dreiging als het risico. Dit betreft de uitschakeling van het tapermodel in het SSM, de herinschakeling van period-to-period correlatie in het site response model, en een aantal wijzigingen in het FCM. Het bronmodel gekalibreerd door TNO leidt echter tot een lager risico dan het bronmodel gekalibreerd door NAM. Eventuele consequenties voor de versterkingsopgave zal TNO verwerken in een advies in de komende reguliere consultatieronde.

De gevoeligheidsanalyse maakt inzichtelijk dat modelkeuzes van significante invloed zijn op de dreigings- en risicoresultaten. Niet al deze keuzes zijn voldoende vertegenwoordigd in de beslisboom van de SDRA2021. Deze aspecten verdienen nadere beschouwing, onder andere binnen het onderzoeksprogramma voor de verdere modelontwikkeling van de SDRA. De resultaten van de gevoeligheidsanalyse kunnen daarnaast mede richting geven aan de prioritering binnen het onderzoeksprogramma.



## 8 Referenties

- Bommer, J., B. Edwards, P. Kruiver, A. Rodriguez-Marek, P. Stafford, B. Dost, M. Ntinalexis, E. Ruigrok and J. Spetzler (2019). V6 Ground-Motion Model (GMM) for Induced Seismicity in the Groningen Field With Assurance Letter, december 2019.
- EZK (2018). Brief van de minister van Economische Zaken en Klimaat, Kamerstuk 33529, nr 457, 30 maart 2018.
- EZK (2020a). Ontwerp-vaststellingsbesluit Groningen gasveld 2020-2021, Kenmerk DGKE-PGG/20086572.
- EZK (2020b). Raming Gaswinning Groningen 2020/2021 en verder, Kenmerk DGKE-PGG/20027392, 21 februari 2020.
- EZK (2021a). Verzoek tot voorstellen operationele strategie voor het gasjaar 2021-2022, Kenmerk DGKE-PDG/20330147.
- EZK (2021b). Raming Gaswinning Groningen 2021/2022 en verder, Kenmerk DGKE-PDG/21010549, 11 februari 2021.
- GTS (2021). Advies leveringszekerheid voor de benodigde Groningenvolumes en -capaciteiten voor gasjaar 2021/2022 en verder, Kenmerk L 21.0042, 29 januari 2021.
- KEM (2020). KEM-10 research review, evaluation and interpretation of "Public seismic hazard and risk assessment model Groningen 2018-2019".
- KNMI (2021). <http://rdsa.knmi.nl/>.
- Meijdam, H., M. van Eeten, L. Evers, P. van Geel, en I. Helsloot (2015). Eindadvies Handelingsperspectief voor Groningen. Adviescommissie 'Omgaan met risico's van geïnduceerde aardbevingen', 14 december 2015.
- NAM (2019). Operationele Strategieën voor het Gasjaar 2019/2020, inclusief Appendix A: Seismic Hazard and Risk Assessment Groningen Field update for Production Profile GTS 2019, EP201903202798, 22 maart 2019.
- NAM (2020). Operationele Strategieën voor het Gasjaar 2020/2021, inclusief Appendix A: Seismic Hazard and Risk Assessment Groningen Field update for Production Profile GTS 2020, EP202002207545, 13 maart 2020 (update 9 april 2020).
- TNO (2019). Comparative analysis of the NAM and TNO implementation in the Groningen Seismic Hazard and Risk Assessment. TNO 2019 R11997.
- TNO (2020a). Probabilistic Seismic Hazard and Risk Analysis in the TNO Model Chain Groningen. TNO 2020 R11052.
- TNO (2020b). IT-platform for the TNO Groningen Model Chain PSHRA calculations. TNO 2020 R10474.
- TNO (2020c). Status of the TNO Model Chain Groningen per October 1, 2020 and recommendations for the public Seismic Hazard and Risk Analysis 2021. TNO 2020 R11464, 9 oktober 2020.
- TNO (2020d). Advies vaststellingsbesluit Groningen gasveld 2020/2021, AGE 20-10.043, 11 mei 2020.
- TNO (2020e). Typologie-gebaseerde beoordeling van de veiligheid bij aardbevingen in Groningen – Veilige typologieën, TNO 2020 R10698, 1 juni 2020.
- TNO (2020f). Typologie-gebaseerde beoordeling van de veiligheid bij aardbevingen in Groningen – Addendum, TNO 2020 R11102, 15 september 2020.

TNO (2020g). TNO Model Chain Groningen: Update and quick scan comparison of 2020 HRA model, TNO 2020 R11659, 6 november 2020.

TNO (2021). Proposed research activities for model development in the public SHRA Groningen, TNO 2021 R10153, 20 januari 2021.

Tessella (2020). Software review report TNO PSHRA Software Assessment SodM.

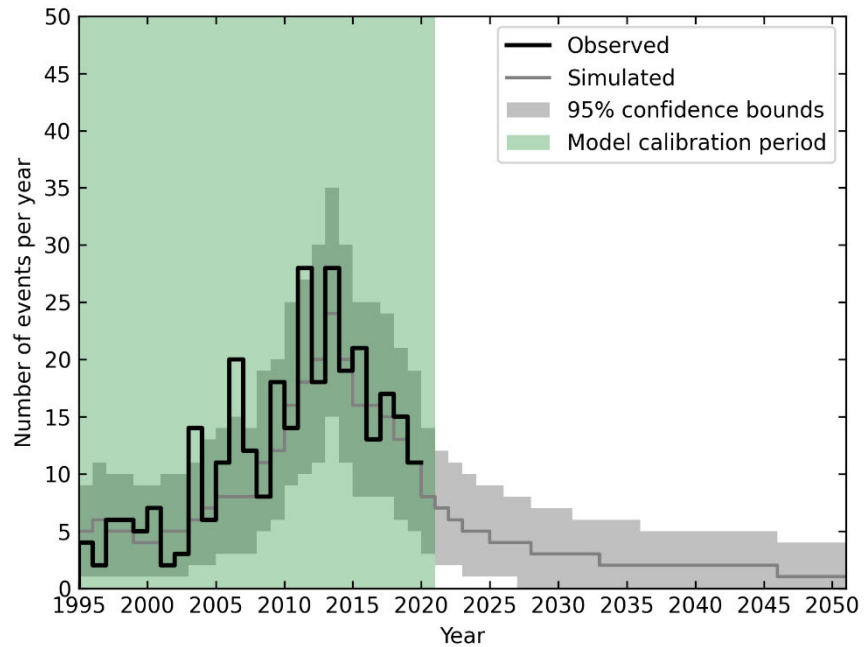
## 9 Ondertekening

Utrecht, 24 maart 2021

TNO

A redacted signature area consisting of two horizontal black bars. The top bar is shorter, and the bottom bar is longer, extending further to the right.

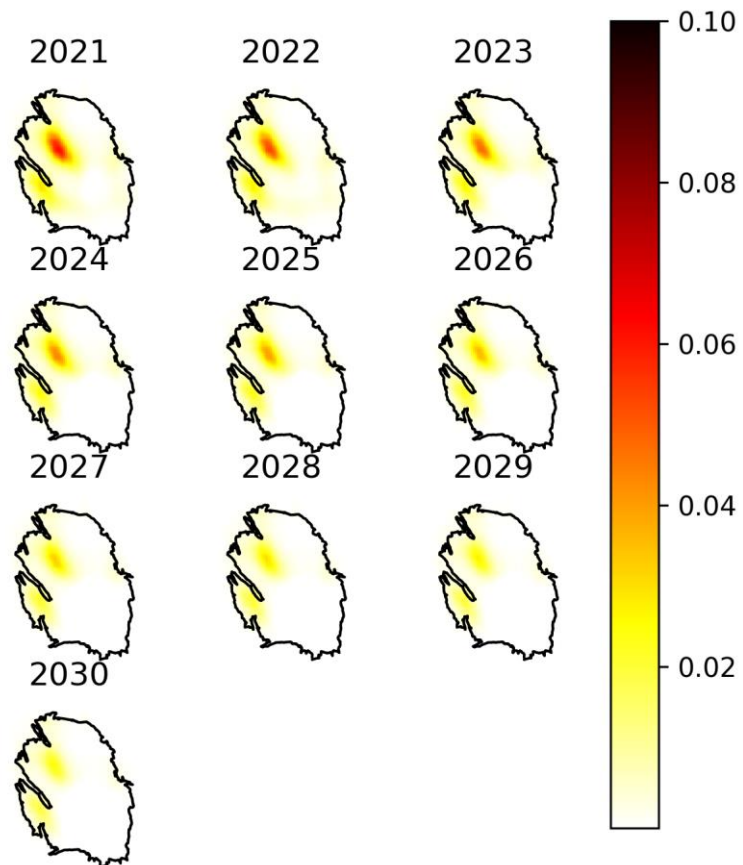
## Appendix A – Seismiciteit per kalenderjaar



Figuur A.1 Verwachte seismische activiteit en variatie per kalenderjaar voor een gemiddeld temperatuurverloop. Op de horizontale as staat het kalenderjaar (1 januari 1995 tot en met 31 december 2050). Op de verticale as staat het aantal bevingen opgeteld per kalenderjaar. Onderschrift als in Figuur 3.1.

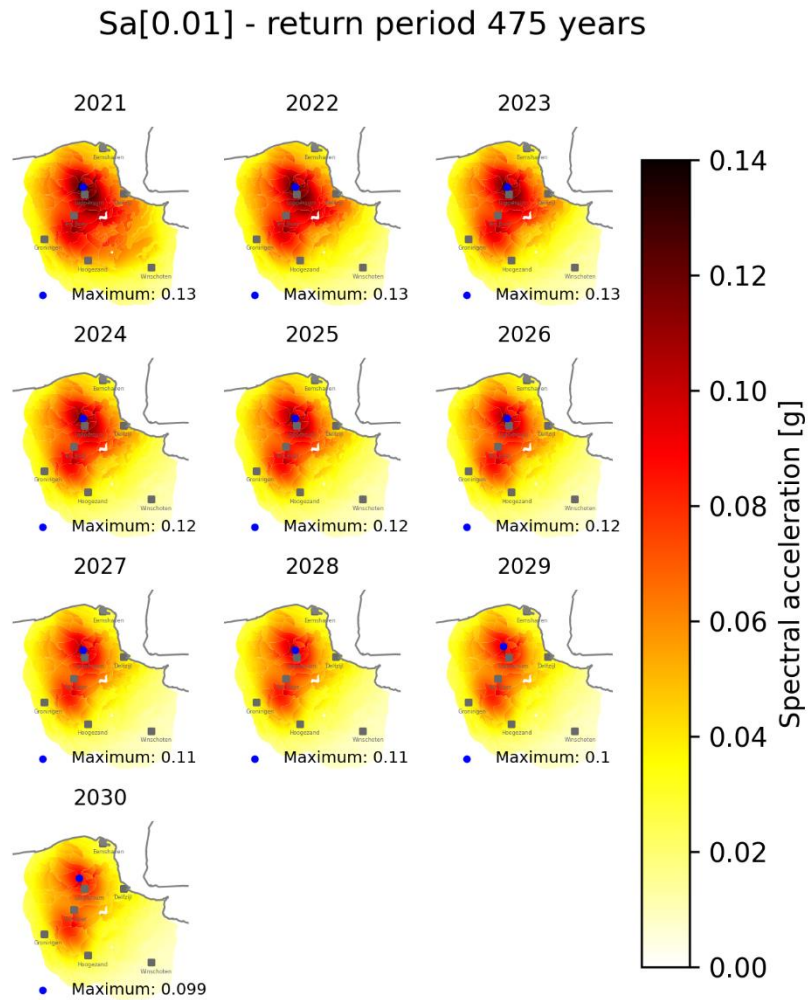
Tabel A.1 Jaarlijkse overschrijdingskans voor een aantal geselecteerde magnitudes per kalenderjaar voor een gemiddeld temperatuurverloop. Onderschrift als in Tabel 3.1 voor kalenderjaar.

	Rate	M3.5	M3.6	M4.0	M4.5	M5.0
2021	6.32	7.57%	5.75%	1.62%	0.22%	0.03%
2022	5.55	6.69%	5.08%	1.44%	0.19%	0.03%
2023	4.88	5.89%	4.48%	1.27%	0.17%	0.03%
2024	4.47	5.41%	4.11%	1.16%	0.16%	0.02%
2025	4.10	4.96%	3.76%	1.07%	0.14%	0.02%
2026	3.77	4.57%	3.47%	0.98%	0.13%	0.02%
2027	3.47	4.20%	3.18%	0.90%	0.12%	0.02%
2028	3.21	3.89%	2.94%	0.83%	0.11%	0.02%
2029	2.98	3.60%	2.72%	0.76%	0.10%	0.02%
2030	2.79	3.37%	2.54%	0.71%	0.10%	0.01%

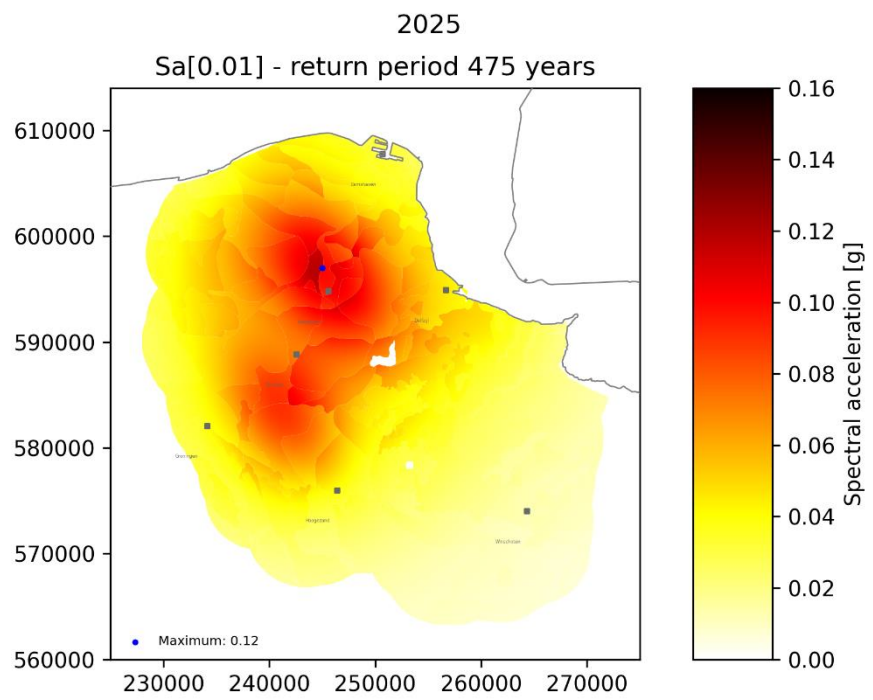
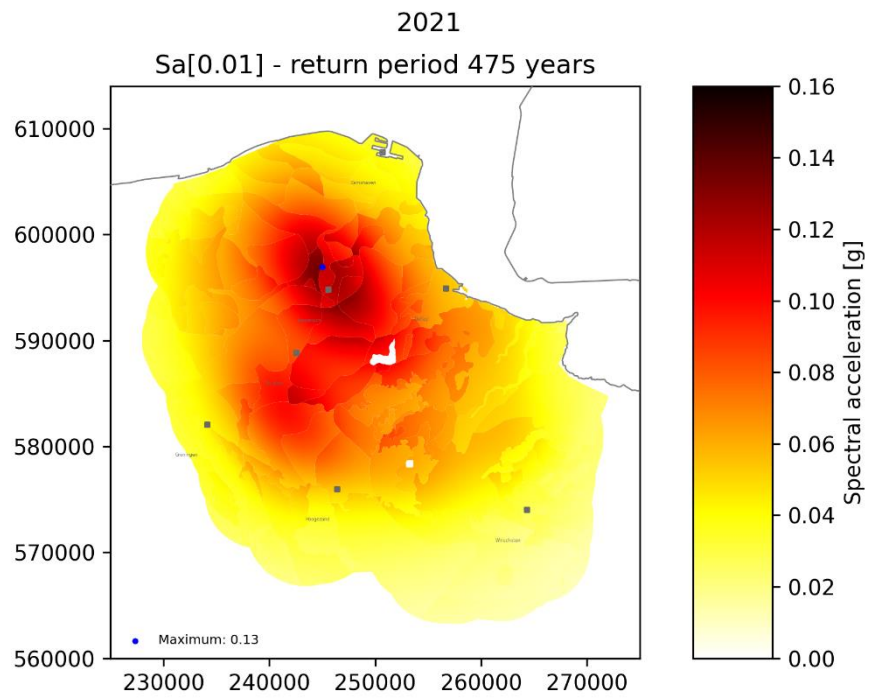
Forecasted annual event density [km<sup>-2</sup>]

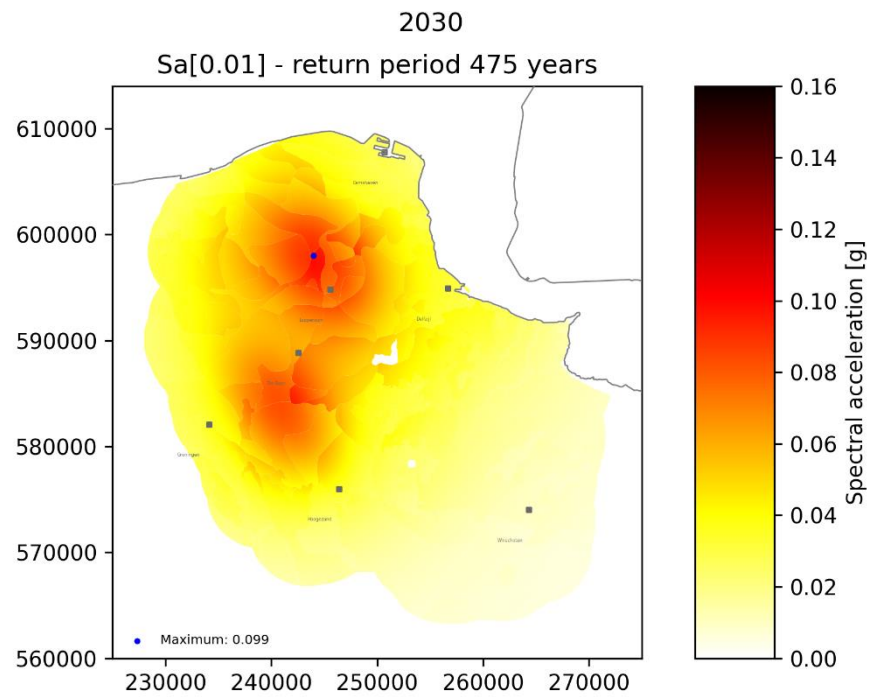
Figuur A.2 Jaarlijkse aardbevingsdichtheidskaarten (*Forecasted annual event density maps*) voor kalenderjaar 2021 tot en met kalenderjaar 2030 in stappen van één kalenderjaar. De kaarten zijn gebaseerd op de operationele strategie van NAM volgens de GTS-raming 2021 voor een gemiddeld temperatuurverloop. Onderschrift als in Figuur 3.2 voor kalenderjaar.

## Appendix B – Dreiging per kalenderjaar



Figuur B.1 Overzicht van de jaarlijkse seismische dreigingskaarten voor kalenderjaar 2020 tot en met kalenderjaar 2030 in stappen van één kalenderjaar voor een gemiddeld temperatuurverloop. Onderschrift als in Figuur 4.1.

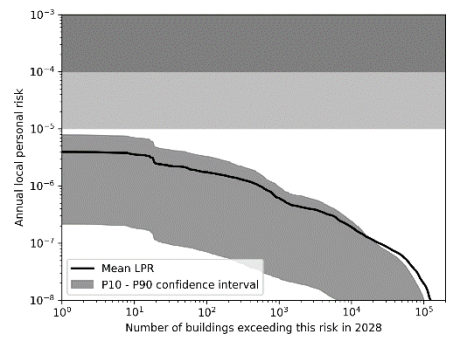
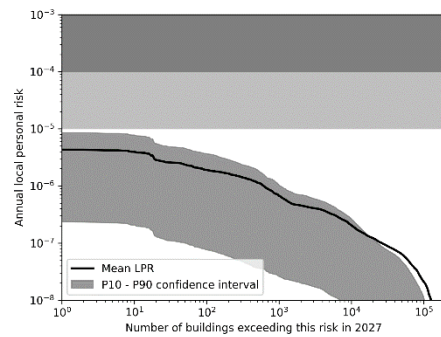
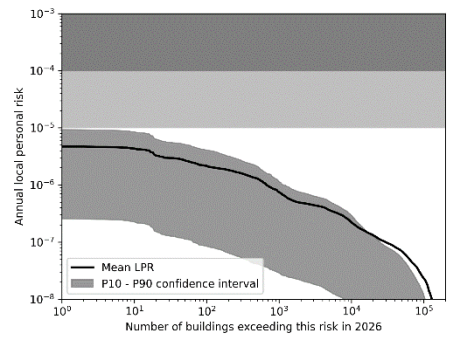
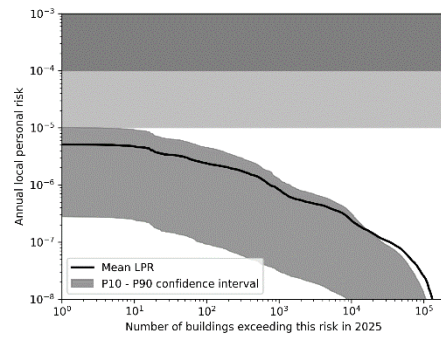
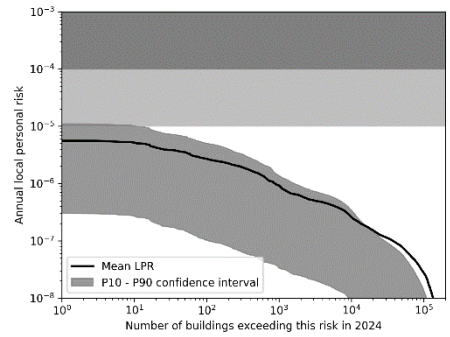
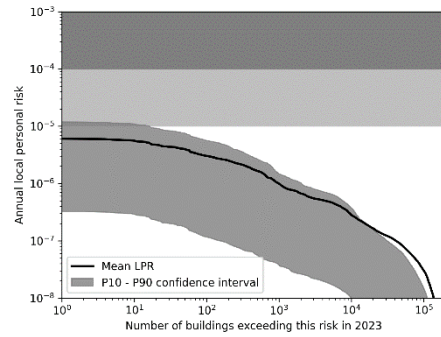
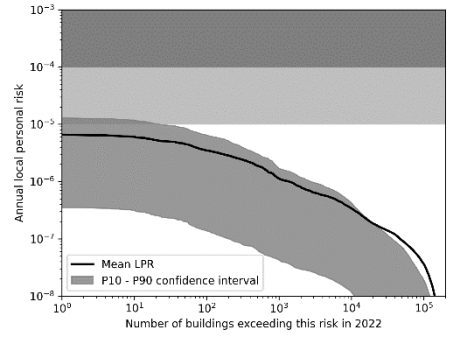
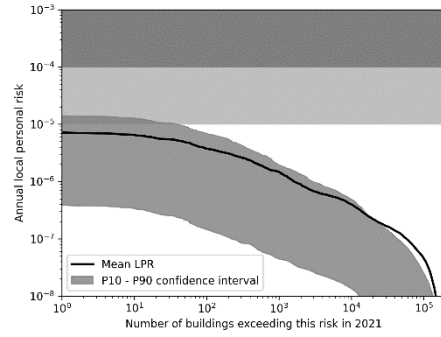


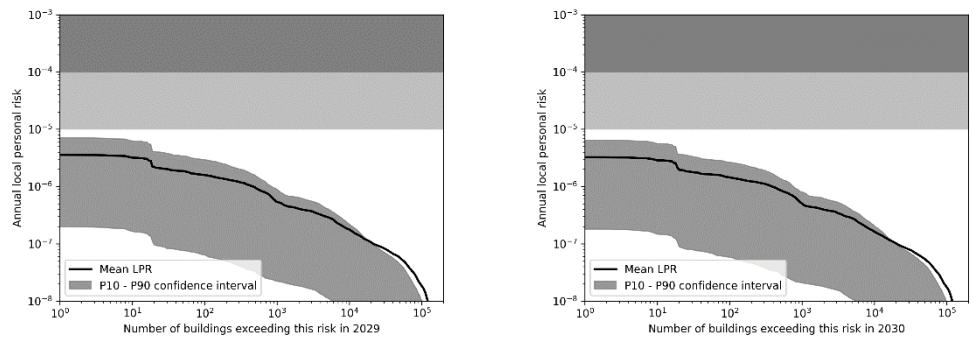


Figuur B.2 Seismische dreigingskaarten voor kalenderjaar 2021, 2025 en 2030 voor een gemiddeld temperatuurverloop. Deze kaarten in groot formaat zijn identiek aan de mozaïekkaarten van Figuur B.1 voor de getoonde kalenderjaren. Onderschrift als in Figuur 4.2.

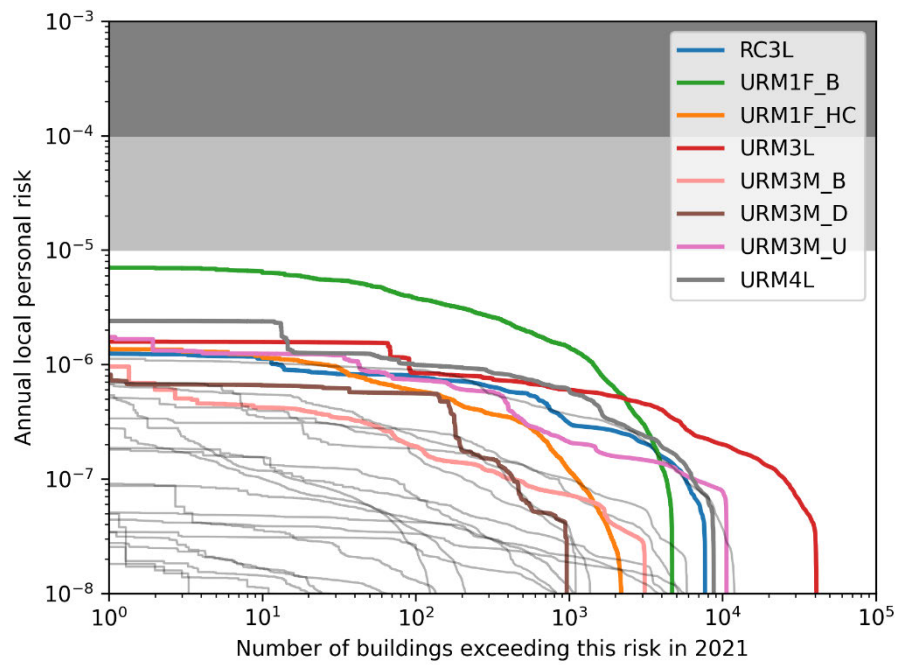


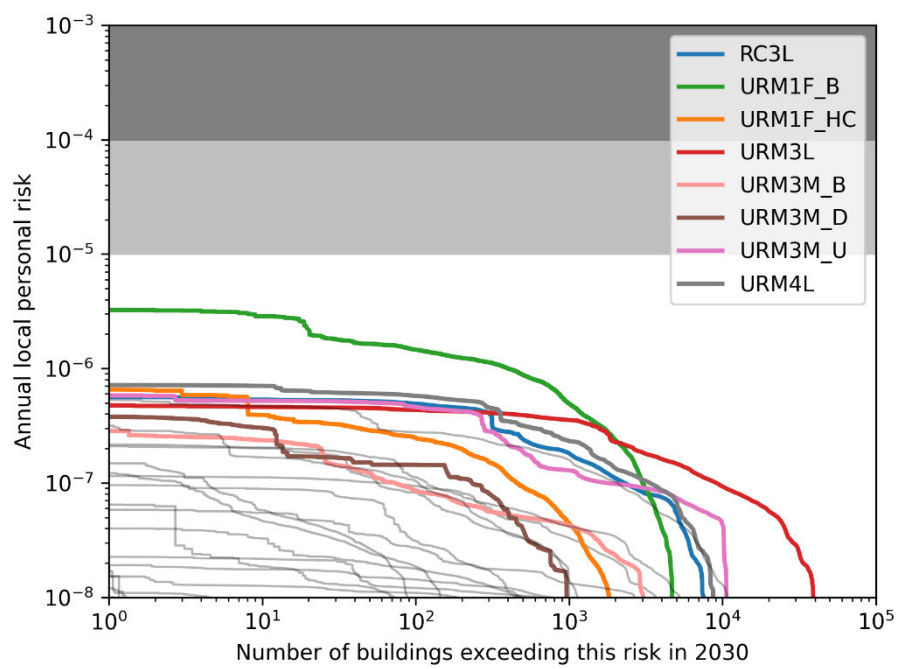
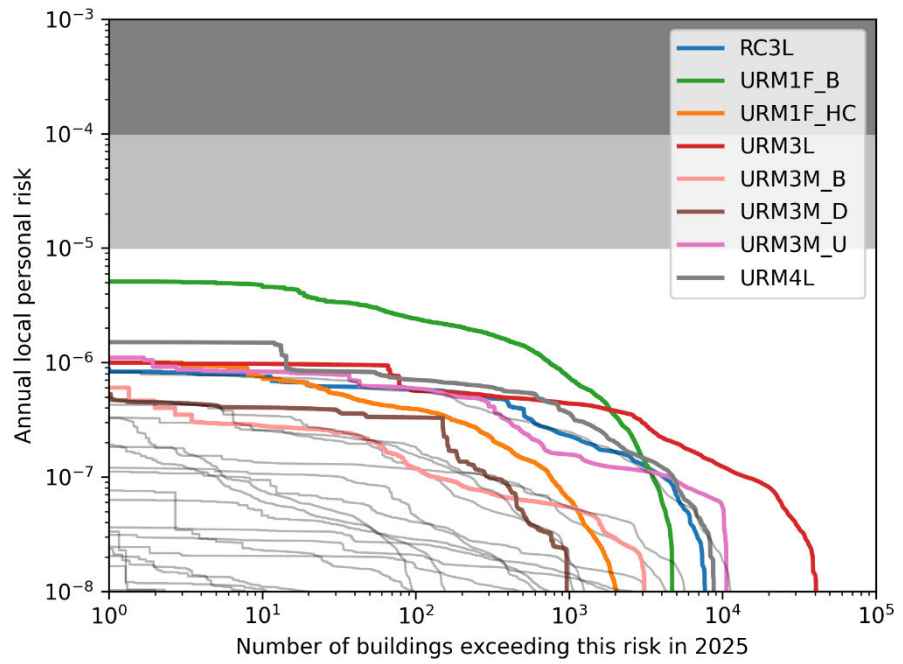
## Appendix C – Risico per kalenderjaar





Figuur C.1 LPR grafieken voor kalenderjaar 2021 tot en met kalenderjaar 2030 met een gemiddeld temperatuurverloop. Onderschrift als in Figuur 5.1.





Figuur C.2 LPR grafieken voor kalenderjaren 2021, 2025 en 2030 met een gemiddeld temperatuurverloop. Onderschrift als in Figuur 5.2.

Tabel C.1 Het aantal gebouwen per kalenderjaar van 2020 tot en met 2030 waarvan de verwachtingswaarde of de P90 niet aan de Meijdamnorm (mean LPR van  $10^{-5}$  per jaar) voldoet volgens een gemiddeld temperatuurverloop.

	Mean LPR 1e-4	Mean LPR 1e-5	P90 LPR 1e-4	P90 LPR 1e-5
2021	0	0	0	37
2022	0	0	0	21
2023	0	0	0	16
2024	0	0	0	10
2025	0	0	0	1
2026	0	0	0	0
2027	0	0	0	0
2028	0	0	0	0
2029	0	0	0	0
2030	0	0	0	0

## Appendix D – Disaggregatie van dreiging

### Disaggregatie van de dreiging voor geselecteerde locaties

Voor meer inzicht in de herkomst van seismische dreiging kunnen de bijdragen van verschillende variabelen worden uitgesplitst in een zogenaamde disaggregatie. Voorbeelden van deze variabelen zijn de magnitude, de afstand van het breukvlak (hypocentrum) van de beving tot het evaluatiepunt aan het maaiveld en variabiliteit in de verwachte grondbewegingen, uitgedrukt in (grotweg) het aantal standaarddeviaties ten opzichte van de mediaan. Daarnaast is de uitsplitsing van deze bijdragen afhankelijk van de locatie waarvoor de berekening wordt gemaakt. Voor de berekeningen in deze sectie zijn twee representatieve geografische locaties gekozen: Groningen (stad) en Loppersum. In deze sectie tonen ook we de ruimtelijke verdeling van de uitsplitsing voor de drie genoemde bijdragen over het gehele Groningenveld.

Figuur D.1 geeft een uitsplitsing (disaggregatie) weer van de seismische dreiging voor Groningen (stad), uitgesplitst in bijdragen van magnitude (linker kolom), breukafstand (midden kolom) en grondbewegingsvariabiliteit (rechter kolom). Figuur D.2 geeft eenzelfde uitsplitsing weer voor Loppersum.

De bovenste rij in Figuren D.1 en D.2 representeren de gemiddelde jaarlijkse spectrale versnelling met een gegeven overschrijdingskans als het gemiddelde van de samengestelde seismische dreigingswaarschijnlijkheidsverdeling. De figuren in de linker bovenhoek laten een positieve correlatie zien tussen de SA en magnitude, waarbij hogere magnitude bevingen typisch hogere SA's geven. De twee figuren daaronder in dezelfde linker kolom (voor een herhalingstijd van respectievelijk 475 en 2475 jaar) zijn afgeleid van de SA verdeling.

In Figuur D.1 (linker kolom, middelste en onderste rij) zien we dat een magnitude 4.5 beving de grootste bijdrage aan de verwachte seismische dreiging voor Groningen (stad) oplevert. De verwachte bijdragen van een 3.5 en een 5.0 beving zijn ongeveer een factor tien lager.

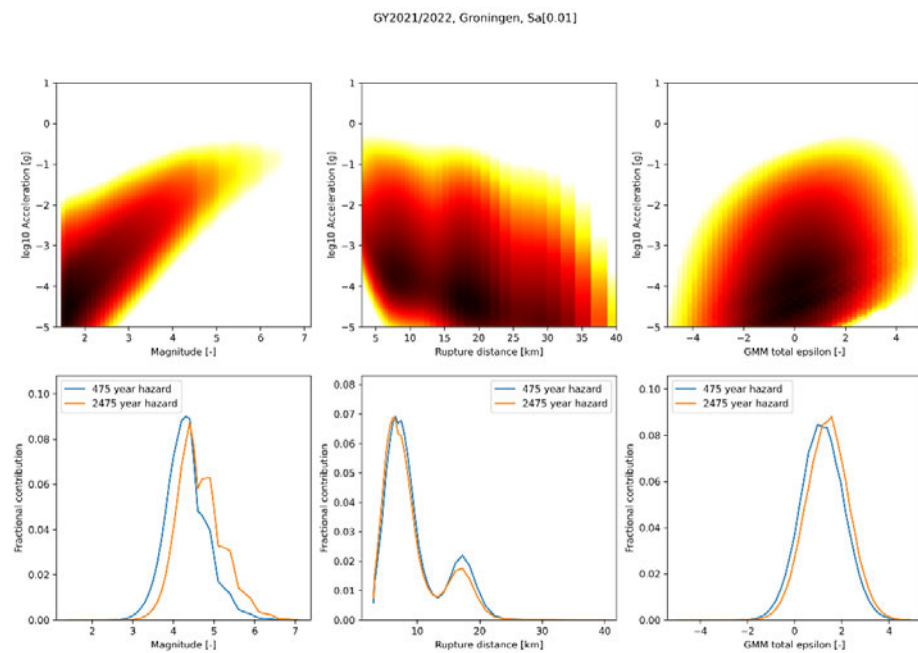
We herhalen deze berekening voor de gezamenlijke verdelingen voor de SA en de afstand tussen het verwachte breukvlak en de locatie op het maaiveld. Figuur D.1 (midden kolom) laat zien dat de een breuk op een afstand van ongeveer 7 kilometer van Groningen (stad) de grootste bijdrage aan de verwachte seismische dreiging oplevert. De redelijk significante bijdrage van een breukafstand van 18 km van Groningen (stad) is het gevolg van het duale seismische systeem: in het Groningenreservoir zijn twee separate bronlocaties van verhoogde seismische activiteit. Het primaire seismische centrum ligt rond Loppersum op zo'n 18 km van Groningen (stad); het secundaire seismische centrum ligt zo'n 7 km ten oosten van Groningen (stad). Dit komt overeen met de ruimtelijke spreiding van dreiging in Figuur 4.1.

Als laatste is de verwachte bijdrage van de grondbewegingsvariabiliteit op de seismische dreiging berekend. Figuur D.1 (rechter kolom) laat zien dat de dominante bijdrage aan overschrijdingen wordt geleverd door grondbewegingen die bovengemiddeld sterk zijn ten opzichte van de verwachte waarde bij gegeven

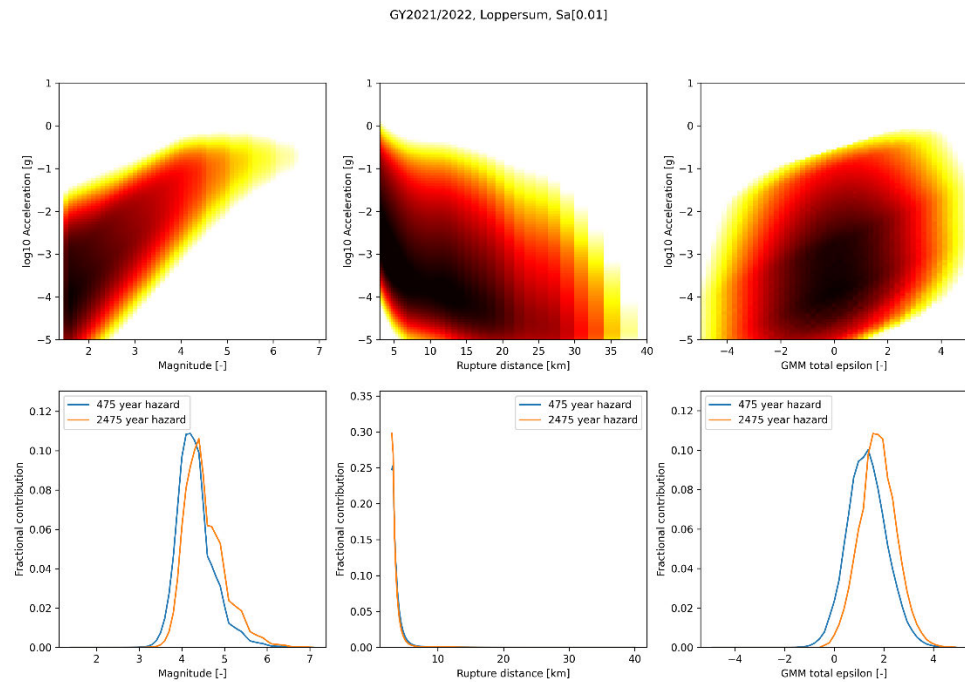
magnitude en breukafstand. Bij langere herhalingsstijden wordt schuift deze disaggregatie naar rechts (de zeldzamere gebeurtenissen worden belangrijker).

Samengevat demonstreert Figuur D.1 dat voor Groningen (stad) de marginale dreigingsbijdragen gegeven worden door een modale magnitude van 4.5, een primaire modale breukafstand van 7 km, een secundaire modale breukafstand van 18 km en een modale grondbewegingsvariabiliteit van 1 standaard deviatie boven de mediaan.

Figuur D.2 geeft eenzelfde disaggregatie weer van de seismische dreiging voor Loppersum. Volgens een vergelijkbare uitleg als hierboven voor Groningen (stad) demonstreert Figuur D.2 dat voor Loppersum de marginale dreigingsbijdragen gegeven worden door een modale magnitude van 4.0, een modale breukafstand van 3 km en een modale grondbewegingsvariabiliteit van 1. Omdat de gashoudende laag op 3 km diepte ligt en de bevingen gelokaliseerd worden op die diepte (KNMI, 2021), betekent een modale breukafstand (= afstand tussen het breukvlak van een verwachte beving en het maaiveld) van 3 km dat de modale bijdrage van aardbevingen direct onder Loppersum ligt.



Figuur D.1 Disaggregatie (uitsplitsing) van de seismische dreiging voor Groningen (stad), uitgesplitst in de bijdrage van respectievelijk de magnitude (linker kolom), breukafstand (midden kolom) en grondbewegingsvariabiliteit (rechter kolom) voor het gasjaar 2021/2022. De bovenste rij representeert de verwachte verdeling van grondbewegingen (verticale as, SA bij 0.01s, ofwel PGA) ten gevolge van aardbevingen, uitgesplitst naar herkomst van de grootte op de horizontale as. De onderste rij toont de herkomst van alle overschrijdingen van de grondbeweging met een herhalingsstijd van respectievelijk 475 en 2475 jaar. De figuren zijn gebaseerd op de operationele strategie van NAM volgens de GTS-raming 2021 voor een gemiddeld temperatuurverloop.



Figuur D.2 Disaggregatie van de seismische dreiging voor Loppersum. Zie Figuur D.1 voor het onderschrift.

### Ruimtelijke disaggregatie van de dreiging

Deze sectie toont de ruimtelijke variatie van de disaggregatie van de seismische dreiging uitgesplitst in magnitude, breukafstand en grondbewegingsvariabiliteit. Figuur D.3 laat zien hoe deze drie modale bijdragen aan de seismische dreiging variëren over de hele regio. Een herhalingsperiode van 475 jaar komt overeen met een overschrijdingskans van 0.2105% per jaar. Een herhalingsperiode van 2475 jaar komt overeen met een overschrijdingskans van 0.0404% per jaar.

Samenvattend voor de seismische dreiging met een overschrijdingskans van 0,2105% per jaar, zijn de modale bijdragen aan de seismische dreiging in het gebied te wijten aan verwachte bevingen met magnitudes tussen de 3.9 en 4.5, aan breukafstanden tussen de 3 en 20 km en aan een variabiliteit van grondbewegingen tussen de 0.5 en 1.5.

In Figuur D.3 zien we dat de modale magnitude van 3.9 tot 4.2 een dominante bijdrage aan de seismische dreiging levert op plaatsen direct boven gebieden met een hogere aardbevingsdichtheid (zie ook Figuur 3.2), zoals rond Loppersum. In het zuidwesten van het gebied neemt dit toe tot magnitude 4.5. In Groningen (stad), Winschoten, Delfzijl en Eemshaven komt de grootste bijdrage aan de seismische dreiging van bevingen met magnitudes van 4.2 tot 4.5.

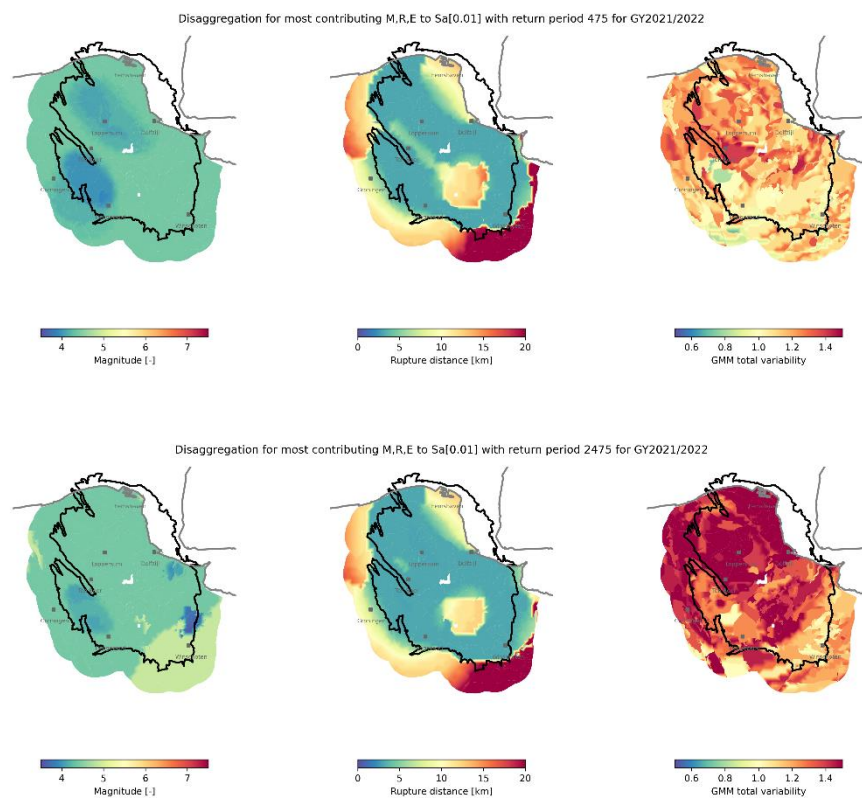
Voor vrijwel het gehele centrale deel van het gebied komt de primaire modale breukafstand overeen met de reservoirdiepte van 3 km. Dit geeft aan dat de lokale seismische dreiging wordt bepaald door de lokale onderliggende seismiteit. Langs



de noordrand van het veld (regio Eemshaven) en in het centraal-zuidelijk gebied (regio Noodbroek) wordt de dreiging veroorzaakt door deze zelfde breuken in het centrale deel. Dit is te zien door de bijdrage van grotere breukafstanden in deze delen van het veld.

Voor de langere herhalingsperiode van 2475 jaar zien we dat de bijdragen aan de dreiging moet komen van hogere modale magnitudes ( $> 4.4$ ) in het noorden en aan de randen van het veld. De breukafstand van 3 km blijft de belangrijkste bijdrage leveren aan de seismische dreiging in het centrale deel van het veld.

Figuur D.3 laat zien dat de ruimtelijke uitsplitsing van de bijdragen aan de dreiging in het aardbevingsgebied gegeven worden door een primaire modale magnitude van 4.0 en een primaire modale breukafstand van 3 km verdeelt over twee aardbevingshaarden: één noordwest-zuidoost over de Loppersumregio en één gebied in de regio ten zuiden van Ten Boer.



Figuur D.3 Ruimtelijke variatie van de dominante (modale) bijdrage aan de seismische dreiging van elk van de grootheden magnitude (linker kolom), breukafstand (midden kolom) en groundbewegingsvariabiliteit (rechter kolom) voor een herhalingsstijd van 475 jaar (bovenste rij) en 2475 jaar (onderste rij).



## Appendix E – Disaggregatie van risico

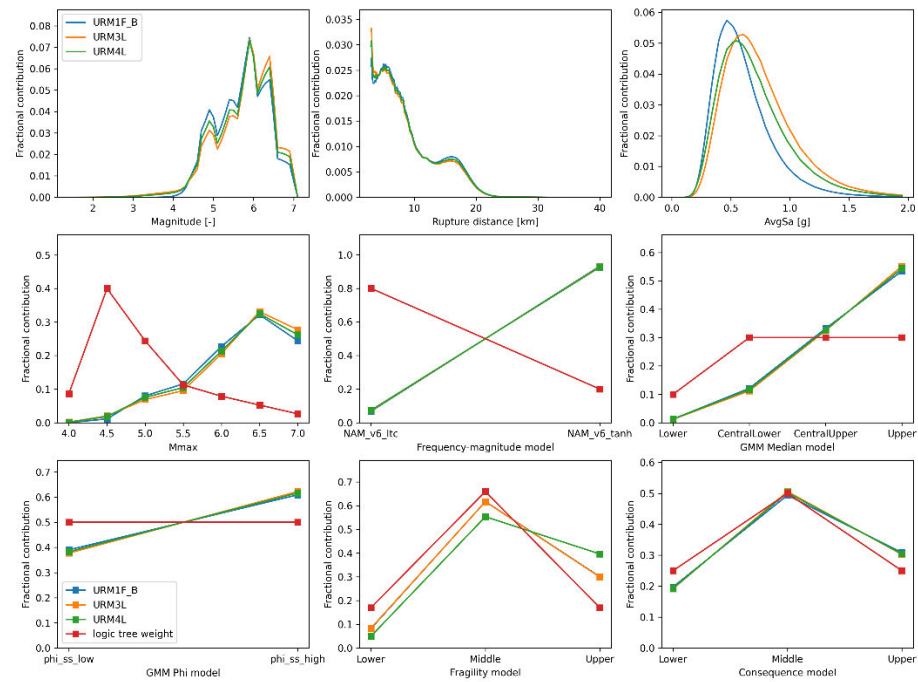
### Disaggregatie van het risico voor geselecteerde typologieën

Vergelijkbaar met de disaggregatie van de seismische dreiging (Appendix D) is voor het risico ook een uitsplitsing gemaakt van de bijdrage van de magnitude van verwachte bevingen, de afstand van het breukvlak van de beving tot het maaiveld, en de gemiddelde spectrale versnelling (SA). Ook is de uitsplitsing van deze bijdragen aan het risico afhankelijk van de locatie waarvoor de berekening wordt gemaakt en van de gebouwtypologie volgens het kwetsbaarheidsmodel. Voor de berekeningen in deze sectie zijn twee representatieve geografische locaties gekozen: Groningen (stad) en Loppersum, en de drie meest kwetsbare gebouwtypologieën, zoals typisch geassocieerd met de hoogste LPR-waarden (zie Figuur 5.2): URM1F\_B (de schuur van een boerderij), URM3L en URM4L (gemetselde rijtjeshuizen met grote gevelopeningen op de begane grond).

Figuren E.1 en E.2 laten de resultaten van de uitsplitsing van risicobijdrage zien voor Groningen (stad) en Loppersum, respectievelijk. Voor Groningen (stad) laat Figuur E.1 (linker kolom) de bijdrage van de maximale modale magnitude van 6.0 aan het risico zien voor alle drie de typologieën. Daarnaast komen de verschillende lokale maxima en buigpunten overeen met de keuze van de discrete  $M_{\max}$ -waarden in de beslisboom (zie Figuur 2.1). De primaire modale breukafstand is 5 km en zoals ook eerder werd waargenomen in de uitsplitsingsresultaten van de dreiging zien we een secundaire modale breukafstand van 16 km. Opvallend is dat de maximale bijdrage aan risico een breukafstand van 3 km is: dit betekent dat de aardbevingshaard lokaal onder Groningen (stad) ligt. De gemiddelde PSA-risicobijdragen (rechter kolom) laten een duidelijke modus zien rond 0.5 g voor alle typologieën.

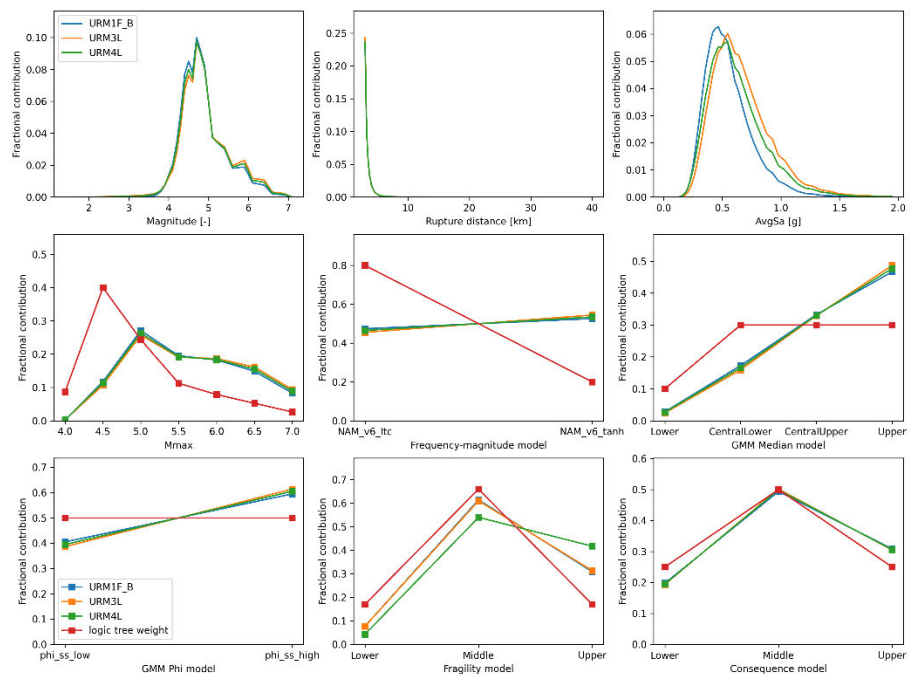
Figuur E.2 toont de resultaten van de uitsplitsing van risicobijdrage voor Loppersum. Voor alle drie de typologieën is de marginale bijdrage van magnitudes aan de gemiddelde LPR bimodaal met de primaire modus op  $M = 4.7$  en de secundaire modus op  $M = 4.5$ . Dit wordt geïnterpreteerd als het gevolg van de discontinuïteit in de magnitudeverdeling in de beslisboom. De bijdrage van de breukafstand heeft een duidelijke modus bij 3 km en een sterke afname bij toenemende afstand, zoals eerder gezien in de uitsplitsingsresultaten van de dreiging. Merk op dat er een factor tien verschil is in schaal van de verticale as voor de bijdrage van de breukafstand aan het risico (middelste kolom) tussen Figuur E.1 en E.2. De verdelingen van de gemiddelde PSA-risicobijdragen vertonen allemaal een goed gedefinieerde modus bij ongeveer 0.5 g.

GY2021/2022, Groningen



Figuur E.1 Disaggregatie (uitsplitsing) van het seismisch risico voor Groningen (stad), uitgesplitst in de bijdrage van respectievelijk de magnitude (linksboven), breukafstand (midden boven) en gemiddelde pseudo spectrale versnelling (rechtsboven), en de zes vertakkingen van de beslisboom, voor het gasjaar 2021/2022 voor de drie meest kwetsbare gebouwtypologieën: URM1F\_B , URM3L en URM4L. Bij de disaggregatie van de beslisboom is ook de instelling van de gewichten per tak getoond.

GY2021/2022, Loppersum

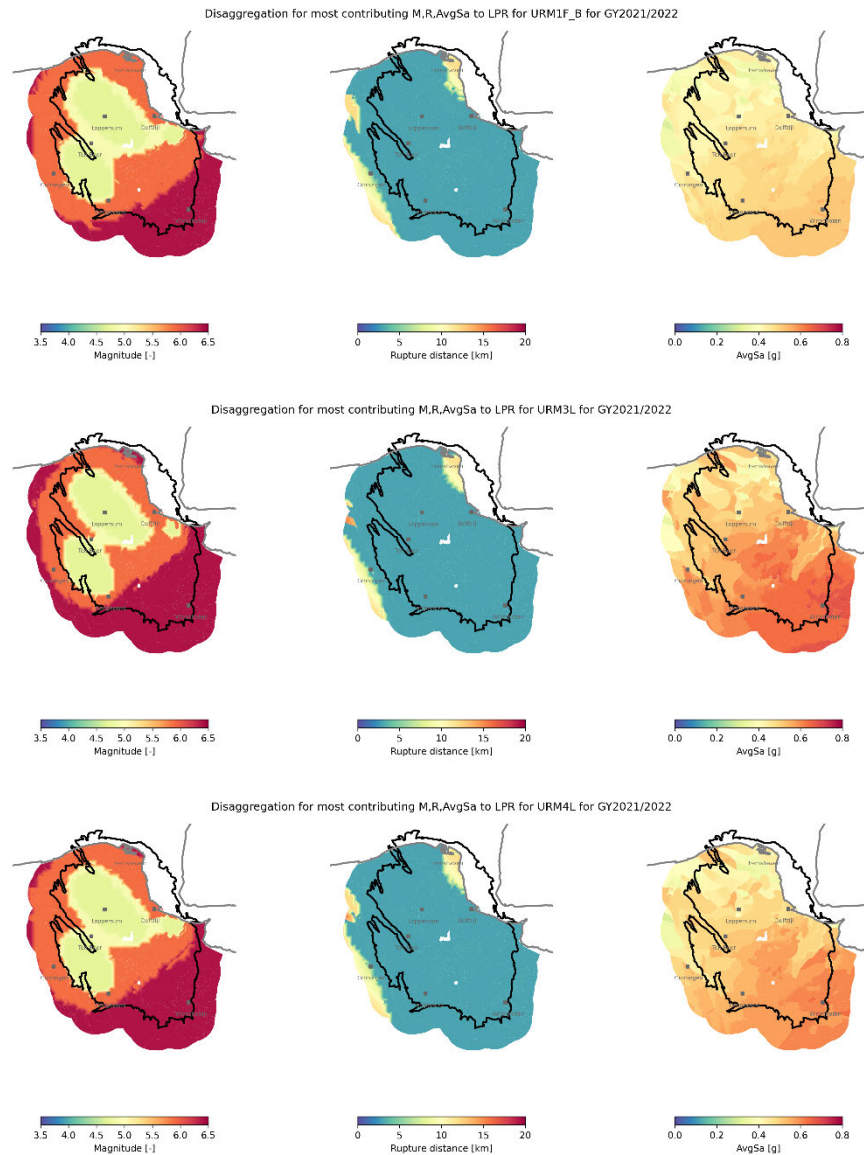


Figuur E.2 Disaggregatie van het seismisch risico voor Loppersum. Onderschrift als in Figuur E.1.

### **Ruimtelijke disaggregatie van het risico**

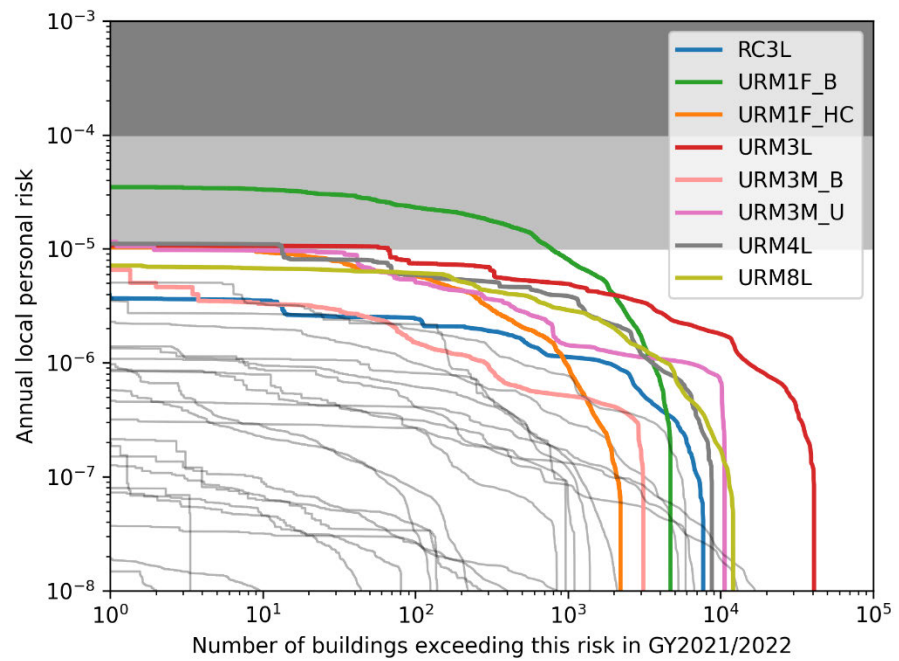
Deze sectie toont de ruimtelijke variatie van de disaggregatie van het seismische risico (LPR) uitgesplitst in magnitude, breukafstand en pseudo spectrale versnelling (PSA). Figuur E.3 laat zien hoe deze drie bijdragen aan de seismische dreiging variëren over de hele regio voor de drie typologieën, die geassocieerd worden met de hoogste waarden van de LPR.

Voor alle drie de typologieën is de oppervlakteverdeling van modale magnitudes en breukafstanden vergelijkbaar. Magnitudes tussen de 4.5 en 5.0 leveren de grootste bijdrage aan het risico in de centrale delen van het gebied rond Loppersum en ten zuiden van Ten Boer. Ten zuidoosten van dit centrale gebied nemen de magnitudes die de grootste bijdrage aan het risico leveren toe tot 6.5. Zoals eerder gezien in de resultaten van de uitsplitsing van de dreiging, wordt het grootste deel van het seismische risico geassocieerd met lokale onderliggende seismische activiteit in het centrale gebied. Alleen rond Eemshaven en ten oosten van de stad Groningen neemt dit toe tot 10 km. De modale waarden van gemiddelde PSA zijn het laagst in het noordoosten en het centrale deel van het veld voor alle drie de typologieën.



Figuur E.3 Ruimtelijke variatie van de disaggregatie van het seismisch risico uitgesplitst in magnitude (linker kolom), breukafstand (midden kolom) en pseudo spectrale versnelling (rechter kolom) voor de drie typologieën die geassocieerd worden met de hoogste verwachtingswaarde van het risico: URM1F\_B (bovenste rij), URM3L (middelste rij) en URM4L (onderste rij).

## Appendix F – Resultaten GVA



Figuur F.1 GVA. LPR grafieken voor gasjaar 2021/2022 met een gemiddeld temperatuurverloop volgens de GVA-modelrealisatie op basis van TNO-advies en -aanbevelingen (TNO, 2020c; 2020d). In de figuur geeft een curve de verwachtingswaarde voor elke typologie. De gekleurde curven zijn apart benoemd in de legenda. Onderschrift als in Figuur 5.2