

TNO PUBLIEK

Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht
Postbus 80015
3508 TA Utrecht

www.tno.nl

T +31 88 866 42 56
F +31 88 866 44 75

TNO-rapport**TNO2022 R10517****Publieke Seismische Dreigings- en
Risicoanalyse Groningen gasveld 2022**

Datum 25 maart 2022

Auteur(s)

Oplage

Aantal pagina's 48 (incl. bijlagen)

Aantal bijlagen 3

Projectnaam publieke SDRA Groningen

Projectnummer 060.51885

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.

© 2022 TNO

TNO PUBLIEK

Samenvatting

Publieke SDRA 2022

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 2022 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

Tot en met 2020 heeft NAM de SDRA voor Groningen uitgevoerd onder de titel HRA. Sinds 2021 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 gebruiken 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 2022

- 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 5,1 in het gasjaar 2022/2023 tot 2,3 in het gasjaar 2032/2033. Ter vergelijking: het verwachte aantal bevingen is 5,6 in het gasjaar 2021/2022.

- Het hoogste aantal bevingen per vierkante kilometer ligt ook de komende jaren in de regio Loppersum en rond het Eemskanaal-productiecluster.
- Samen met het dalend aantal bevingen nemen 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 herhalingsijd bedraagt 0,13 g in het gasjaar 2022/2023. Deze neemt geleidelijk af tot 0,09 g in het gasjaar 2032/2033 en verder tot 0,08 g in het gasjaar 2052/2053.
- Alle gebouwen in het aardbevingsgebied voldoen volgens de voorgeschreven modelkeuzes per gasjaar 2022/2023 aan de Meijdamnorm: de verwachtingswaarde van het risico (LPR) voor alle gebouwen is aanzienlijk lager dan 10^{-5} per jaar in gasjaar 2022/2023 en verder.

Resultaten risicoanalyse cf. laatste wetenschappelijke inzichten van TNO

Voor het uitvoeren van de SDRA 2022 heeft EZK mede 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 en voor de SDRA 2021, maar wijken op belangrijke punten af van de aanbevelingen van TNO in het Statusrapport 2021 conform de meest recente wetenschappelijke inzichten van TNO. De aanbevelingen van TNO leiden tot een aanzienlijk hogere verwachtingswaarde van het persoonlijk risico. In totaliteit leidt dit voor het gasjaar 2022/2023 tot 930 gebouwen die niet aan de Meijdamnorm voldoen. Dit zijn voornamelijk aanpalende schuren als onderdeel van vrijstaande boerderijen.

Summary

Public SHRA 2022

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 2022 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 2022/2023.

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

Up to and including 2020 NAM performed the SHRA for Groningen under the title HRA. Since 2021 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 2022

- 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 5,1 in gas year 2022/2023 to 2,3 in gas year 2032/2033. For comparison: the expected number of events is 5.6 in gas year 2021/2022.
- The largest number of events per square kilometers remain in the regions Loppersum and Ten Boer/Eemskanaal-cluster 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 gas year 2022/2023 and decreases to 0.09 g in gas year 2032/2033 and further to 0.08 g in gas year 2052/2053. 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 gas year 2022/2023 and in the following gas years.

Result cf. scientific recommendations TNO

The execution of the SHRA 2022 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 by NAM and for the SDRA 2021. At several important points, they deviate from the recommendations by TNO, formulated in the Status Report 2021 conform the most recent scientific insights. The recommendations by TNO lead to a significant higher mean value for personal risk. A total of 930 buildings do not meet the Meijdam norm for the gas year 2022/2023.

Inhoudsopgave

Samenvatting	2
Summary	4
1 Inleiding	8
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
2 Modelelementen en modelversies	11
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)	13
2.5 Kwetsbaarheids- en Gevolgmodel (FCM)	13
2.6 Risicomaat	13
2.7 Probabilistiek en modelonzekerheden	14
3 Analyse van de seismiciteit	16
3.1 Seismische activiteit	16
3.2 Kans op zwaardere bevingen	17
3.3 Jaarlijkse aardbevingsdichtheid	17
4 Dreigingsanalyse	19
4.1 Dreigingskaarten	19
5 Risicoanalyse	21
5.1 Risicoverdeling over de Gebouwendatabase	21
5.2 Analyse van epistemische onzekerheden	23
6 Schadeanalyse	26
6.1 Schadetoestand bewoonde gebouwen	26
6.2 Verwerking externe invoergegevens	26
6.3 Prognose schadetoestanden DS1, DS2 en DS3	26
7 Resultaten risicoanalyse cf. laatste wetenschappelijke inzichten van TNO ...	29
7.1 Aanbevelingen TNO	29
7.2 Resultaten uit de aanbevelingen van TNO	29
7.3 Conclusies aanbevelingen TNO	36
8 Referenties	37
9 Ondertekening	39
Appendix A – Disaggregatie van dreiging	40
A.1 Disaggregatie van de dreiging voor geselecteerde locaties	40
A.2 Ruimtelijke disaggregatie van de dreiging	42

Appendix B – Disaggregatie van risico	44
B.1 Disaggregatie van het risico voor geselecteerde typologieën	44
B.2 Ruimtelijke disaggregatie van het risico	46
Appendix C – Afwijkende risicomaat	48

1 Inleiding

1.1 Van gaswinning naar veiligheidsrisico

Geïnduceerde bevingen door gaswinning ontstaan door ongelijkmatige 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 groundbewegingsintensiteit 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 groundbeweging.

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 groundbewegingen 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). Sinds 2021 zijn de dreigings- en risicoberekeningen bij een publieke partij te belegd (EZK, 2018; 2021a). Dit rapport beschrijft de publieke seismische dreiging- en risicoanalyse (SDRA) voor de operationele strategie voor het gasjaar 2022/2023, dat loopt van 1 oktober 2022 tot en met 30 september 2023. In september 2022 neemt de minister van Economische Zaken en Klimaat (EZK) een definitief Vaststellingsbesluit voor gasjaar 2022/2023 voor het Groningenveld (EZK, 2022a).

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, 2020; 2021a; 2022a; KEM, 2020).

In oktober 2021 heeft TNO het zogenoemde Statusrapport opgeleverd waarin de technische status van de TNO Modelketen Groningen wordt beschreven, alsmede aanbevelingen voor modelversies voor gebruik in de publieke SDRA 2022 conform de meest recente wetenschappelijke inzichten van TNO (TNO, 2021c).

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 2022/2023 voor te stellen op basis van de GTS-raming (Gasunie Transport Services) voor datzelfde gasjaar (EZK, 2022a). Het te winnen gasvolume uit het Groningenveld is voor het gasjaar 2022/2023 vastgesteld op 1,7 miljard Nm³ door de jaarlijkse raming van de netbeheerder (GTS, 2022a). Dit temperatuuronafhankelijk “*minimum flow*” scenario leidt tot een aanzienlijke daling ten opzichte van huidig gasjaar 2021/2022, waarin de gaswinning uit het Groningenveld van 3,9 miljard Nm³ is bijgesteld naar 4,6 miljard Nm³ voor een gemiddeld temperatuurverloop (GTS, 2021; 2022a; 2022b).

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 2022 uit te voeren (EZK, 2022a). 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, 2022a).

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 2022 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 behandelt de resultaten volgens de aanbevelingen van TNO conform haar meest recente wetenschappelijke inzichten.

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 2022/2023 en voor de jaren daarna is de inzet van het Groningenveld temperatuurafhankelijk (GTS, 2022a; EZK, 2022a).

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 DS1, 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 fragment¹:

...

Mede op basis van het advies van SodM stel ik vast dat de dreigings- en risicoanalyse dient te worden uitgevoerd met dezelfde keuzes voor modelcomponenten als in de publieke SDRA Groningen 2021 en de berekeningen voor een mogelijke aanpassing van de operationele strategie voor het huidige gasjaar 2021-2022. Specifiek betreft dit de volgende instellingen:

- *Seismologisch bronmodel versie 6 in dezelfde vorm en met dezelfde weging van de takken in de beslisboom als gebruikt in de publieke SDRA Groningen 2021.*
- *Grondbewegingsmodel versie 6 in dezelfde vorm als gebruikt in de publieke SDRA Groningen 2021, waarbij voor de 'period-to- correlatie' de formulering zoals in de documentatie van NAM wordt aangehouden, oftewel exclusief de site response period-to-periodcorrelatie.*
- *Schade/risicomodel versie 7 in dezelfde vorm, met dezelfde coëfficiënten en met dezelfde weging van de takken in de beslisboom als gebruikt in de publieke SDRA Groningen 2021.*
- *Versie Exposure Database (V.7.1) van de Gebouwendatabase, daterende van februari 2021.*

....

¹ Uittreksel uit Bijlage C van de Verwachtingenbrief van EZK aan NAM (EZK, 2022a).

2.2 Extern aangeleverde invoergegevens en informatie

Voor het uitvoeren van de publieke SDRA 2022 Groningen heeft TNO op 7 maart 2022 de volgende invoergegevens ontvangen van NAM:

- Drukken uit het reservoirmodel per gasjaar. Dit omvat onder andere ook de historische en toekomstige reservoirporiëndruk behorende bij de operationele strategie op basis van de GTS-raming 2022.

Onderstaande invoergegevens zijn eerder ontvangen ten behoeve van de SDRA 2021:

- Kalibratiebestanden van het Seismologisch Bronmodel.
- Ruimtelijke veldeigenschappen. Dit omvat de reservoirdikte, compressibiliteit van de gashoudende laag, en de breuken database.
- 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 de drukken uit het reservoirmodel gegenereerd op basis van het aanvullend advies leveringszekerheid voor de benodigde Groningenvolumes en -capaciteiten voor gasjaar 2022/2023 en verder (GTS, 2022a). Uitgangspunten voor deze berekening zijn samengevat (EZK, 2022a):

- Een temperatuuronafhankelijke productie op waakvlamniveau ("*minimum flow*") van 1,7 Nm³ in gasjaar 2022/2023, die nodig is om te voorzien in de leveringszekerheid.
- Dezelfde inzetvolgorde van productielocaties als is vastgesteld voor gasjaar 2021/2022, waarbij de benodigde capaciteit beschikbaar wordt gehouden.
- Voldoende werkvolume in de UGS Norg gedurende de hele winter ten behoeve van de leveringszekerheid.
- Beoogde sluiting van het Groningenveld per 1 oktober 2023.

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 en in de SDRA 2021 voor gasjaar 2021/2022 (NAM, 2020; EZK, 2021a; 2022a). Voor reproduceerbaarheid zijn de specifieke bronmodelinstellingen gebruikt voor het genereren van de resultaten voor de Hoofdstukken 3 tot en met 6, zoals aangegeven in Tabel 2.1. TNO merkt op dat het bronmodel is gekalibreerd tot 1 januari 2021; hierdoor zijn bevingen die plaatsvonden in het kalenderjaar 2021 niet in beschouwing genomen.

Tabel 2.1 Instellingen SSM volgens opdracht EZK (2022a). Gewichten staan tussen haakjes.

Versie	V6, exponentiële schuif trend op breuken
Magnitude-frequentie (MF) model	Stress-afhankelijke b-waarde MF- β (0.2); stress-afhankelijke taper MF- ζ (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
$M_{\max}$	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*) voorgeschreven. Aanvullend is aangegeven dat “voor de ‘period-to-period-correlatie’ de formulering zoals in de documentatie van NAM wordt aangehouden oftewel exclusief de site response period-to-periodcorrelatie”. 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 (2022a). Gewichten staan tussen haakjes.

Versie	V6
GMM mediaan- τ	boven (0.30); midden-boven (0.30); midden-onder (0.30); onder (0.10)
GMM ϕ_{ss}	ϕ_{ss} boven (0.50); ϕ_{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) en voor de SDRA 2021 (EZK, 2021a; 2022a). Tot slot heeft EZK het gebruik van de Gebouwendatabase versie 7.1 voorgeschreven. 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 (2022a). 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 2022 uitgedrukt in termen van de statistische verwachtingswaarde 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 groundbeweging beschrijft. De relatie tussen de kans op geheel of gedeeltelijk instorten en de kans op overlijden in (of direct nabij) 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.

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. Aleatorische onzekerheden worden 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.

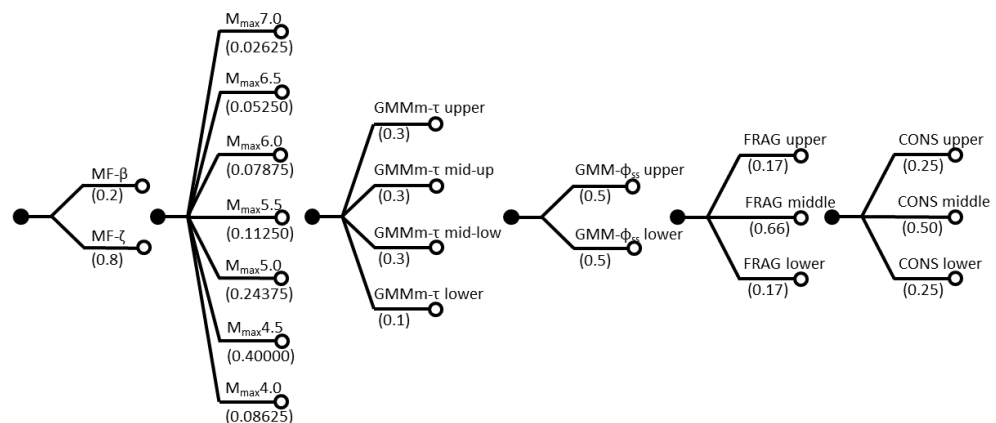
Om rekening te houden met epistemische onzekerheden wordt een "logic tree" gebruikt. Het gebruik van de term "logische boom" in deze context is ongewoon in het Nederlands, vandaar dat we hier de vergelijkbare term "beslisboom" hanteren. De beslisboom voor de SDRA 2022 is weergegeven in Figuur 2.1. Elk van de zes vertakkingsniveaus van de beslisboom vertegenwoordigt een aantal modelalternatieven danwel alternatieven voor modelparameterkeuze. 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) representeert alle epistemische onzekerheden die zijn vastgelegd in de beslisboom.

De beslisboom voor de SDRA 2022 omvat zes vertakkingsniveaus:

1. het magnitude-frequentiemodel (MF),
2. de maximaal mogelijke aardbevingsmagnitude ($M_{\max}$),
3. het grondbeweging mediaan- τ -model (GMMm- τ),
4. het grondbeweging variabiliteit ϕ_{ss} -model (GMM- ϕ_{ss}),
5. het kwetsbaarheidsmodel van gebouwen (*Fragility* – FRAG), en
6. het gevolgmodel (*Consequence* – CONS).

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.



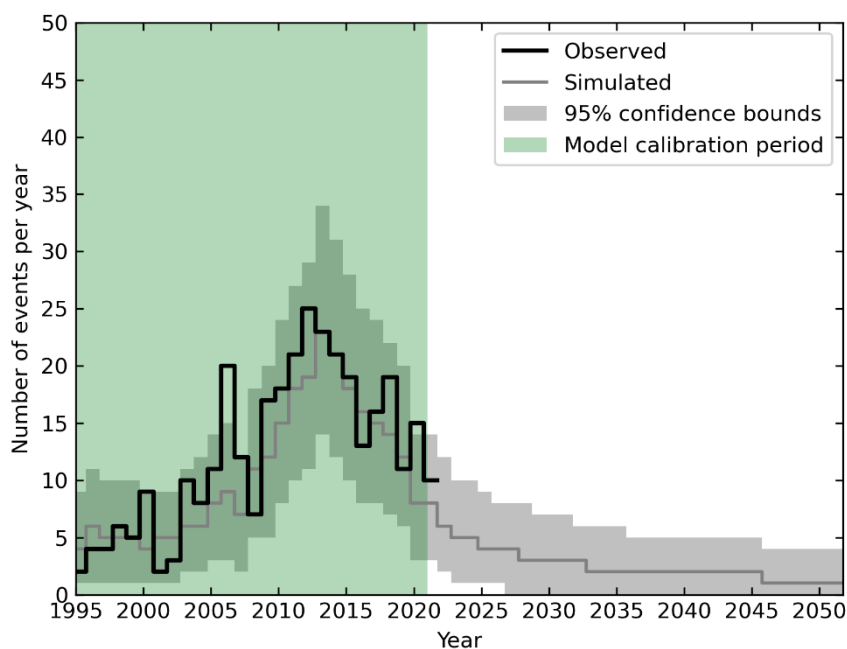
Figuur 2.1 Structuur, waarden en gewichten van de beslisboom (logic tree) voor de probabilistische seismische dreigingsanalyse (linker vier vertakkingsniveaus) en probabilistische seismische risicoanalyse (alle vertakkingsniveaus) naar NAM (2020). MF is het magnitude-frequentiemodel. GMMm- τ staat voor het grondbeweging mediaan- τ -model. GMM- ϕ_{ss} is het grondbeweging variabiliteit ϕ_{ss} -model. FRAG staat voor kwetsbaarheidsmodel (*Fragility model*) en CONS staat voor gevolgmodel (*Consequence model*). 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 modelaannames uit Hoofdstuk 2. De resultaten zijn weergegeven in gasjaren en zijn gebaseerd op de operationele strategie van NAM volgens de GTS-raming 2022 (GTS, 2022a).

3.1 Seismische activiteit

De historisch waargenomen en de totale verwachte jaarlijkse seismische activiteit en variabiliteit per gasjaar is weergegeven in Figuur 3.1. Alleen bevingen met een magnitude gelijk aan of hoger dan 1.5 zijn opgeteld per gasjaar en zijn weergegeven tot 1 oktober 2051. Het aantal bevingen laat een dalende trend zien sinds 2014. Dit is het gevolg van een afnemende gaswinning sinds 2014. Vanaf 2022 wordt een verdere daling van het aantal bevingen verwacht als gevolg van het insluiten van het Groningenveld voor gasproductie (EZK, 2021b; GTS, 2022a).



Figuur 3.1 Verwachte seismische activiteit en variatie per gasjaar. Op de horizontale as staat het kalenderjaar (bereik 1 januari 1995 tot 1 oktober 2051). 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 tot 1 januari 2022. 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. De tabel geeft een overzicht van de tien komende gasjaren, beginnend met het eerstvolgende gasjaar 2022/2023.

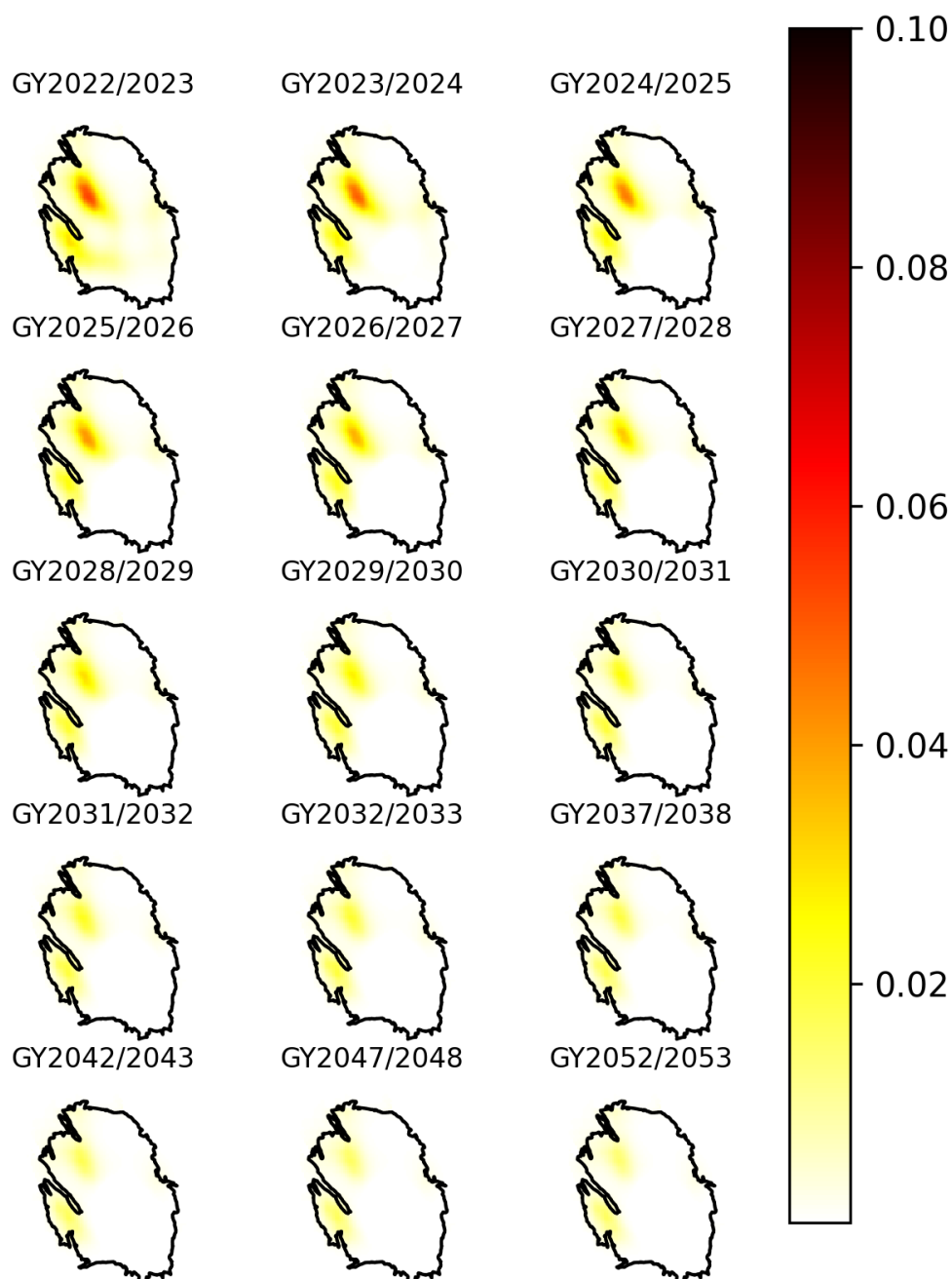
Voor het Groningengebied beschouwen we bevingen met een magnitude gelijk of hoger dan 3,5 als zwaardere bevingen. Ter vergelijking, de Huizingebeving van augustus 2012 had een magnitude van 3,6. De percentages in de tabel zijn de overschrijdingskansen per gasjaar. Het model geeft bijvoorbeeld aan dat in gasjaar 2022/2023 het aantal bevingen gelijk aan of hoger dan M1,5 naar verwachting voor 1,3% zal bestaan uit bevingen met een magnitude van 4,0 of hoger.

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. De eerste kolom geeft het gasjaar (*gas year* – GY) weer.

	Rate	M3.5	M3.6	M4.0	M4.5	M5.0
GY2022/2023	5.08	6.14%	4.66%	1.32%	0.18%	0.03%
GY2023/2024	4.54	5.48%	4.16%	1.18%	0.16%	0.02%
GY2024/2025	4.12	4.97%	3.77%	1.07%	0.15%	0.02%
GY2025/2026	3.78	4.56%	3.46%	0.98%	0.13%	0.02%
GY2026/2027	3.50	4.22%	3.19%	0.90%	0.12%	0.02%
GY2027/2028	3.26	3.93%	2.97%	0.83%	0.11%	0.02%
GY2028/2029	3.04	3.65%	2.76%	0.77%	0.10%	0.02%
GY2029/2030	2.85	3.42%	2.58%	0.72%	0.10%	0.01%
GY2030/2031	2.69	3.23%	2.44%	0.68%	0.09%	0.01%
GY2031/2032	2.48	2.99%	2.25%	0.62%	0.08%	0.01%
GY2032/2033	2.31	2.78%	2.10%	0.58%	0.08%	0.01%

3.3 Jaarlijkse aardbevingsdichtheid

De verwachte jaarlijkse aardbevingsdichtheid voor gasjaren 2022/2023 tot en met 2032/2033 en vervolgens in stappen van vijf jaar tot 2052/2053, is weergegeven in Figuur 3.2. De jaarlijkse aardbevingsdichtheid is het verwachte aantal bevingen met een magnitude gelijk aan of hoger dan 1,5 per vierkante kilometer per jaar. De kleurenschaal voor alle deelfiguren is identiek. 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.

Forecasted annual event density [km⁻²]

Figuur 3.2 Jaarlijkse aardbevingsdichtheidskaarten (*Forecasted annual event density maps*) voor gasjaar 2022/2023 tot en met gasjaar 2032/2033 in stappen van één gasjaar, gevolgd door de kaarten tot en met gasjaar 2052/2053 in stappen van vijf jaar. De kaarten zijn gebaseerd op de operationele strategie van NAM als uitwerking van de GTS-raming 2022.

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 2022 (GTS, 2022a).

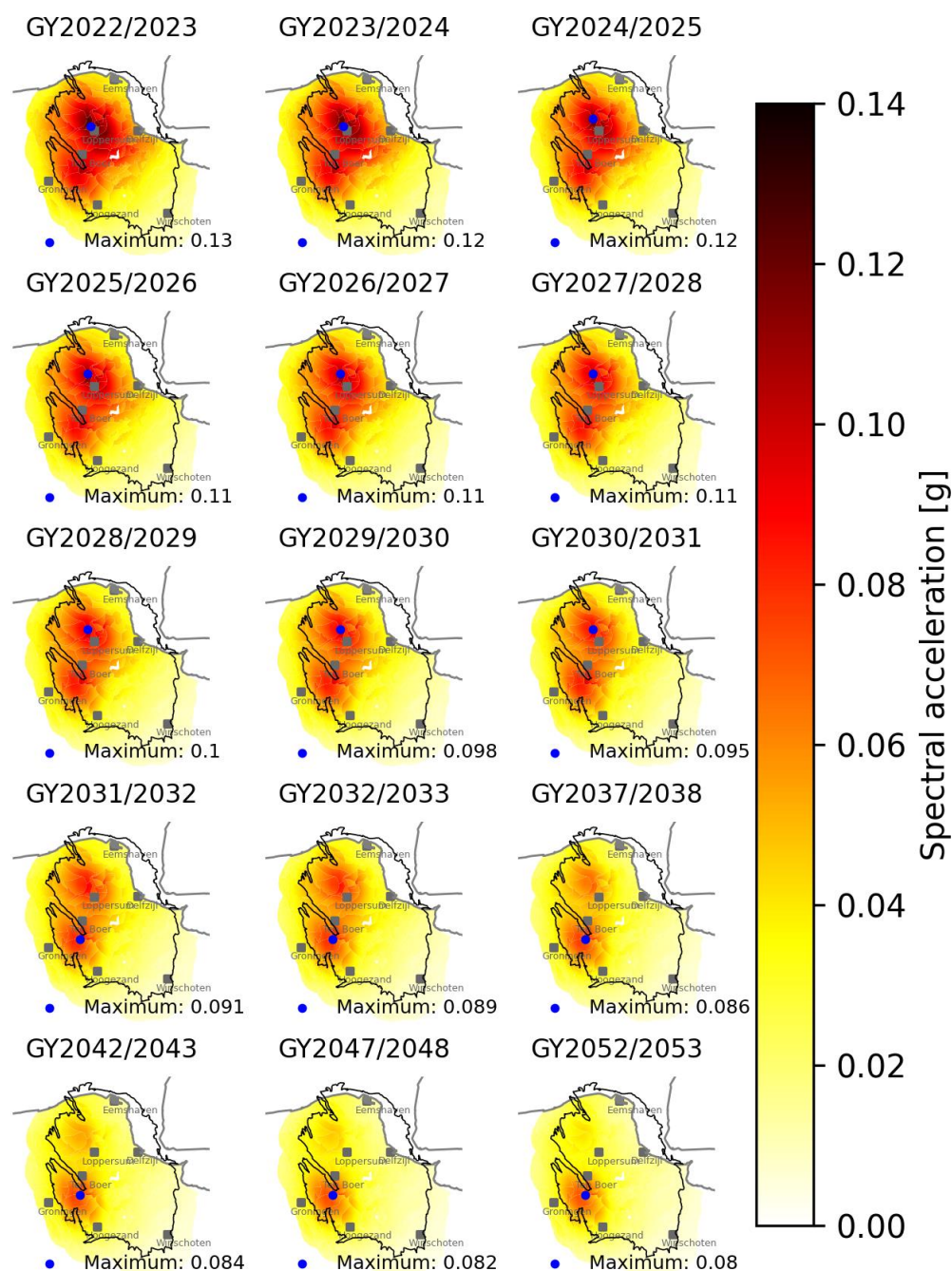
Appendix A geeft een uitsplitsing (disaggregatie) weer van de seismische dreiging op geselecteerde geografische locaties naar de bijdragen van de magnitude, breukafstand en grondbewegingsvariabiliteit. Appendix A toont ook de ruimtelijke variatie van deze uitsplitsing.

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 0.21% per jaar. Spectrale perioden en herhalingstijden worden ook gebruikt voor de berekening van het seismisch risico (Hoofdstuk 5).

De verwachte seismische dreiging bij een herhalingstijd van 475 jaar voor gasjaar 2022/2023 tot en met gasjaar 2052/2053 is weergegeven in Figuur 4.1 in stappen van eerst één en vervolgens vijf gasjaren. Zoals verwacht neemt als gevolg van de dalende gasproductie de seismische dreiging jaarlijks af. Dit is in overeenstemming met de drukvereffening van het reservoir tijdens de latere jaren. 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 daling van de reservoirdruk ten noordwesten van het Loppersum gebied zorgt daar dan voor een relatief hogere seismische dreiging tot en met gasjaar 2030/2031.

Sa[0.01] - return period 475 years



Figuur 4.1 Overzicht van de jaarlijkse seismische dreigingskaarten voor gasjaar 2022/2023 tot en met gasjaar 2032/2033 in stappen van één gasjaar, gevolgd door de kaarten tot en met gasjaar 2052/2053 in stappen van vijf jaar. De kaarten zijn gebaseerd op de operationele strategie van NAM volgens de GTS-raming 2022.

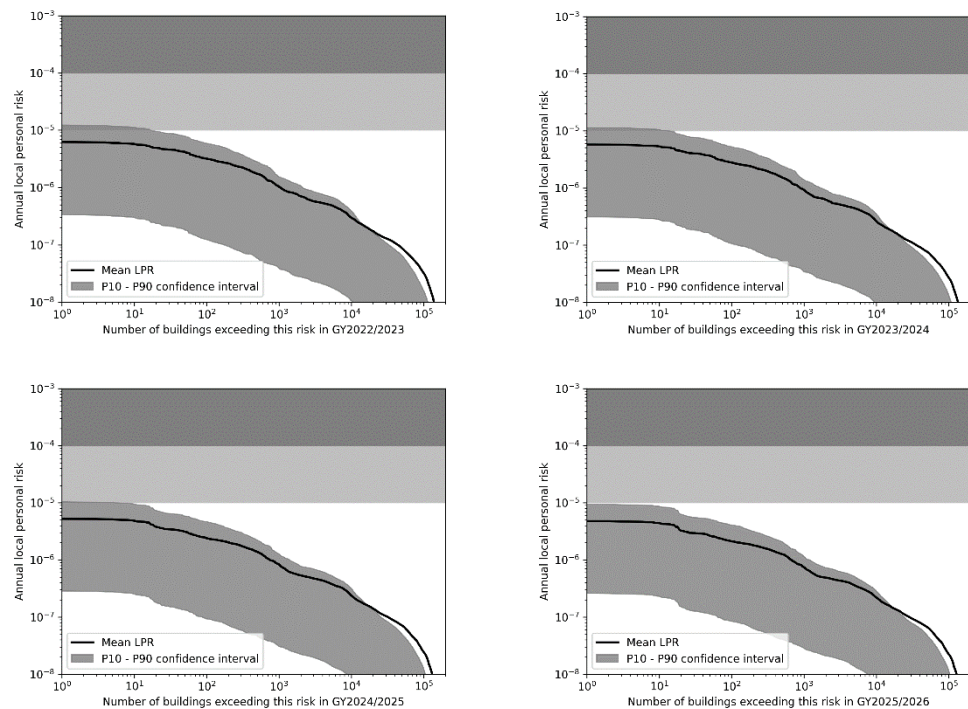
5 Risicoanalyse

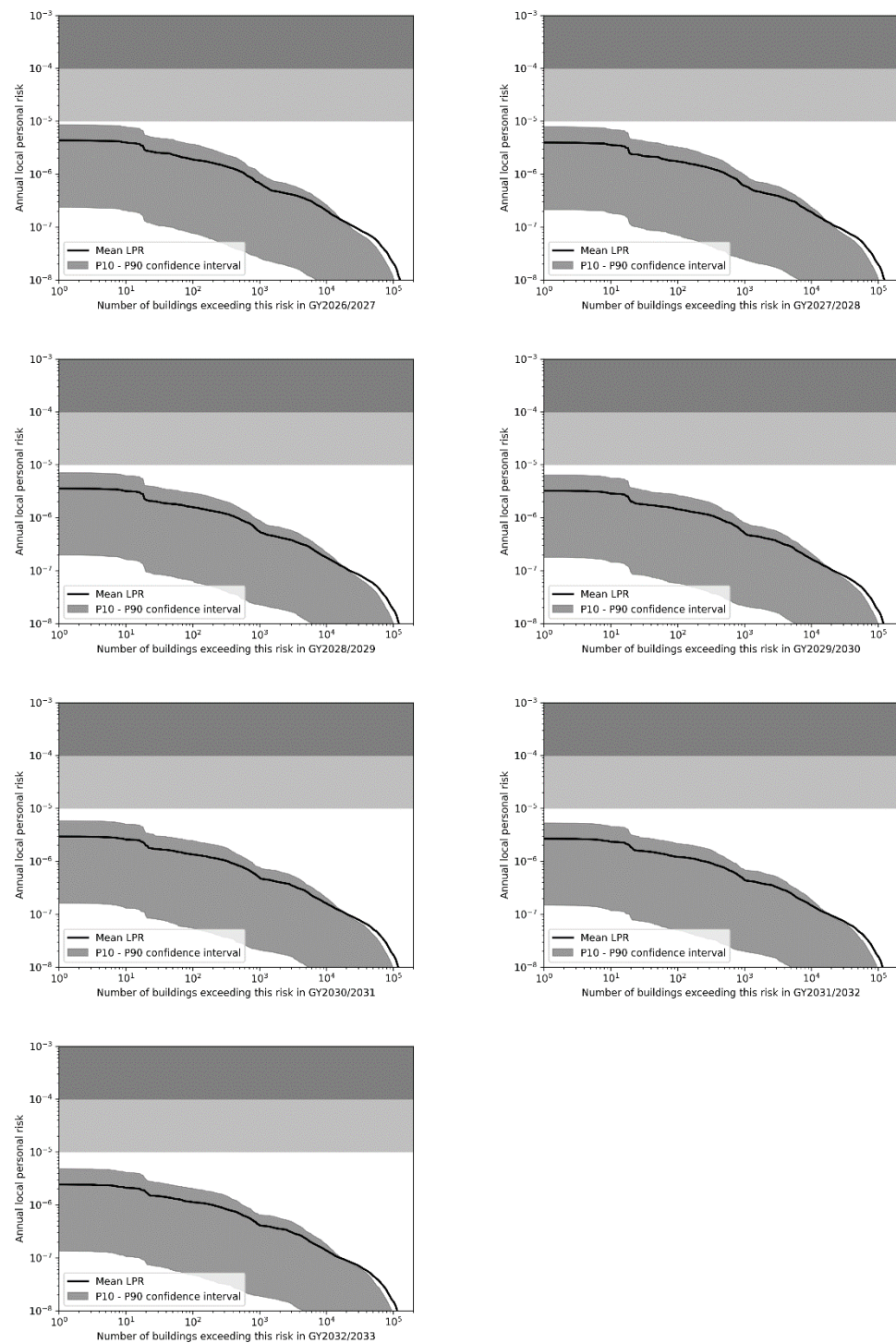
Dit hoofdstuk bevat de resultaten van de seismische risicoanalyse volgens de uitgangspunten, invoergegevens en modelversies uit Hoofdstuk 2. TNO gebruikt in deze publieke SDRA Groningen 2022 als risicomaat de verwachtingswaarde van het Plaatsgebonden Persoonlijk Risico (*Local Personal Risk – LPR*), 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 risicore resultaten 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 2022 (GTS, 2022a).

Appendix B 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 gemiddelde spectrale versnelling. Appendix B 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 het LPR overschrijdt voor het gasjaar 2022/2023 tot en met gasjaar 2032/2033. De grijze band in de LPR-grafieken geeft het onzekerheidsbereik aan.



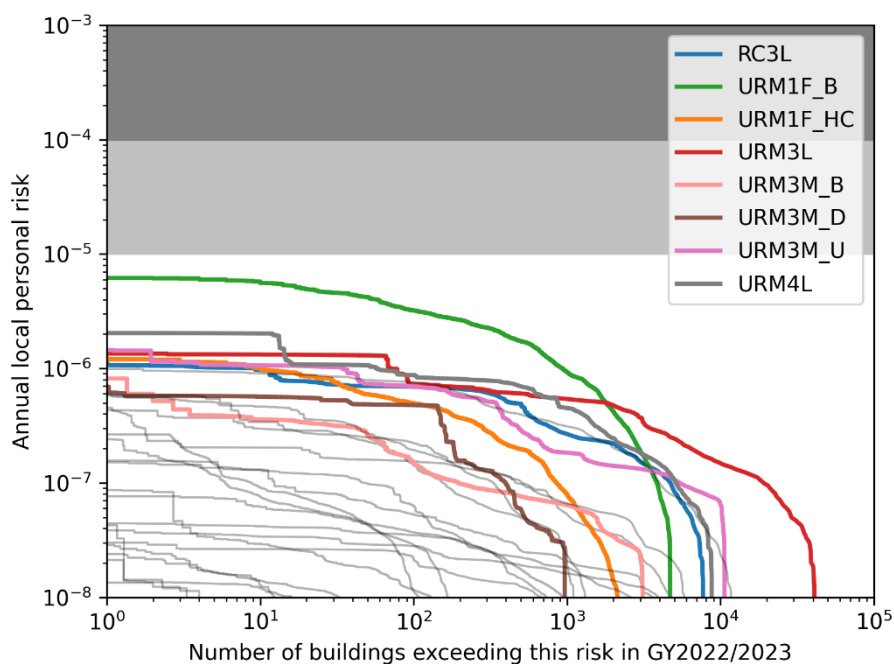


Figuur 5.1 LPR-grafieken voor de gasjaren 2022/2023 tot en met 2032/2033. Op de horizontale as staat het aantal gebouwen; op de verticale as het LPR. De grafieken geven voor elk aantal op horizontale as de LPR-waarde die door deze groep overschreden wordt. De dikke zwarte lijn geeft de verwachtingswaarde (mean) van het LPR aan. De donkergrijze banden geven de spreiding in de beslisboom voor modelonzekerheden weer voor een betrouwbaarheidsinterval tussen de 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 (zie Appendix C voor de afwijkende risicomaat P90). 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.



Figuur 5.2 LPR-grafiek voor gasjaar 2022/2023. 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.

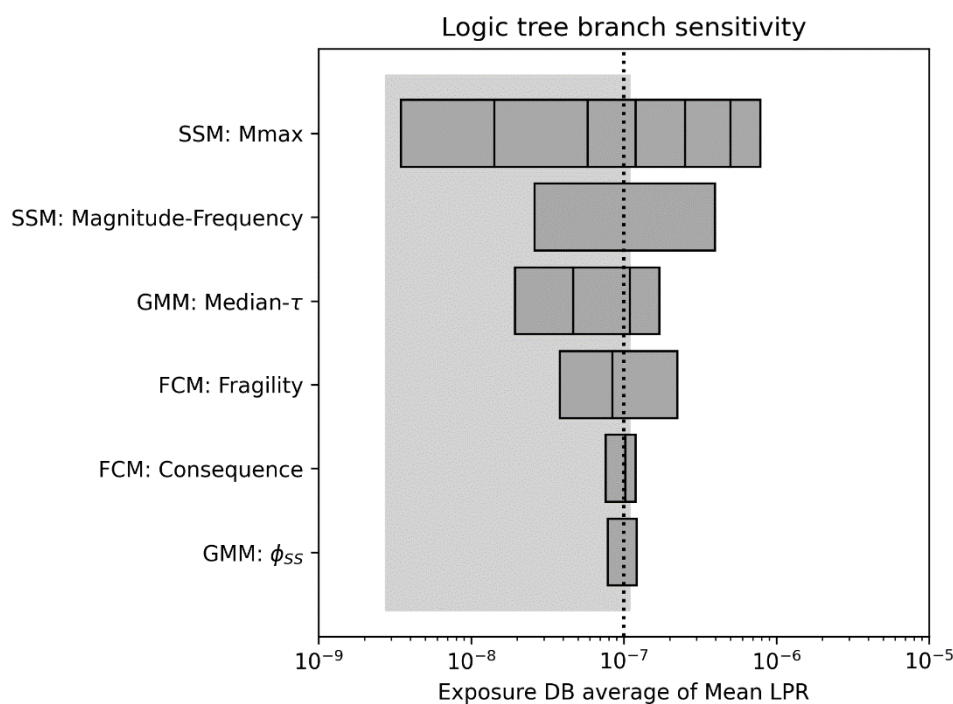
5.2 Analyse van epistemische onzekerheden

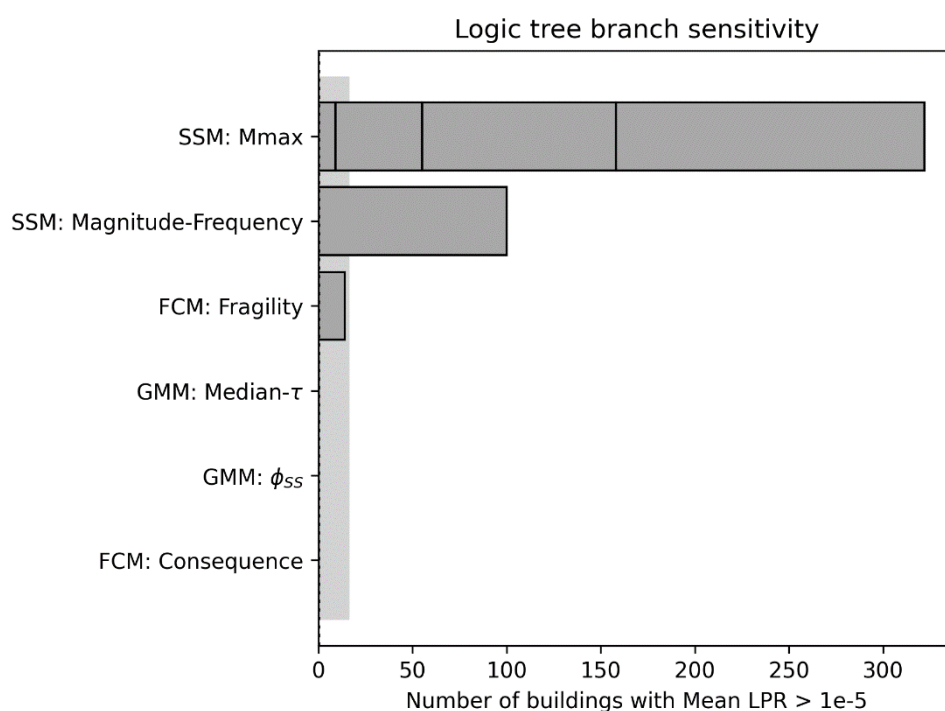
De TNO Modelketen Groningen is een probabilistisch model dat tot doel heeft onzekerheden zoveel mogelijk in rekenschap te nemen (TNO, 2019). De totale verdeling van combinaties van de modelalternatieven danwel alternatieven voor modelparameterkeuze (de aparte takken van de vertakkingsniveaus) karakteriseert 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.

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 gevoeligheden voor afzonderlijke 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 gevoeligheid voor 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, 2021a; 2021d).





Figuur 5.3 Gevoeligheid van het seismisch risico voor epistemische onzekerheden binnen de beslisboom. De bovenste figuur geeft de gevoeligheid van het 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 het 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 2022/2023.

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 met "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 schade prognose gebied. Het aandachtsgebied is hetzelfde als dat 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 Prognose schadetoestanden DS1, DS2 en DS3

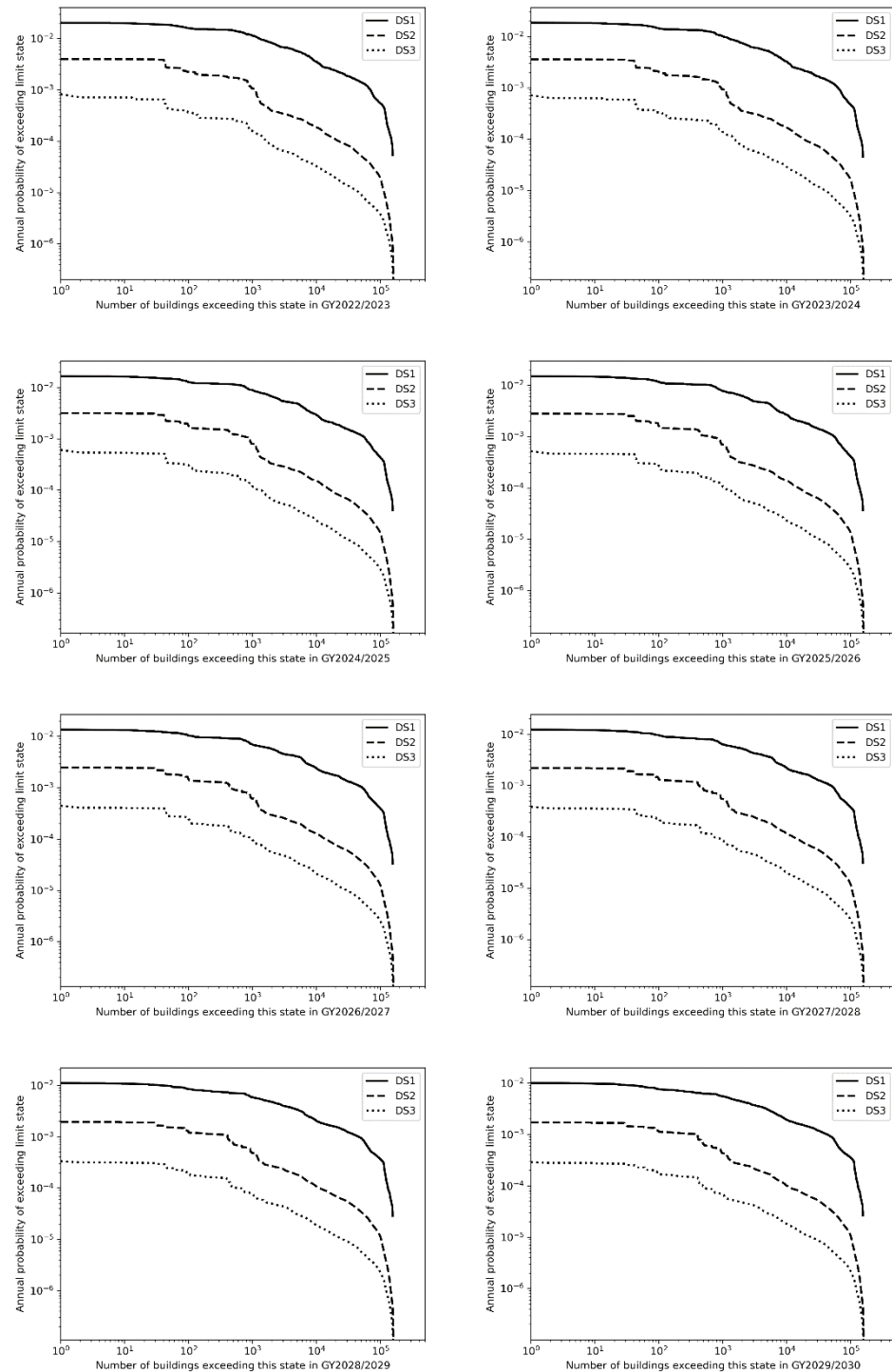
Voor de berekening van de kans op overschrijding van de laagste schadetoestand DS1 worden empirische modellen voor grondbeweging en kwetsbaarheid gebruikt, dat wil zeggen, modellen die gebaseerd zijn op de lokaal geobserveerde grondbewegingen en schades (NAM, 2020, 2021).

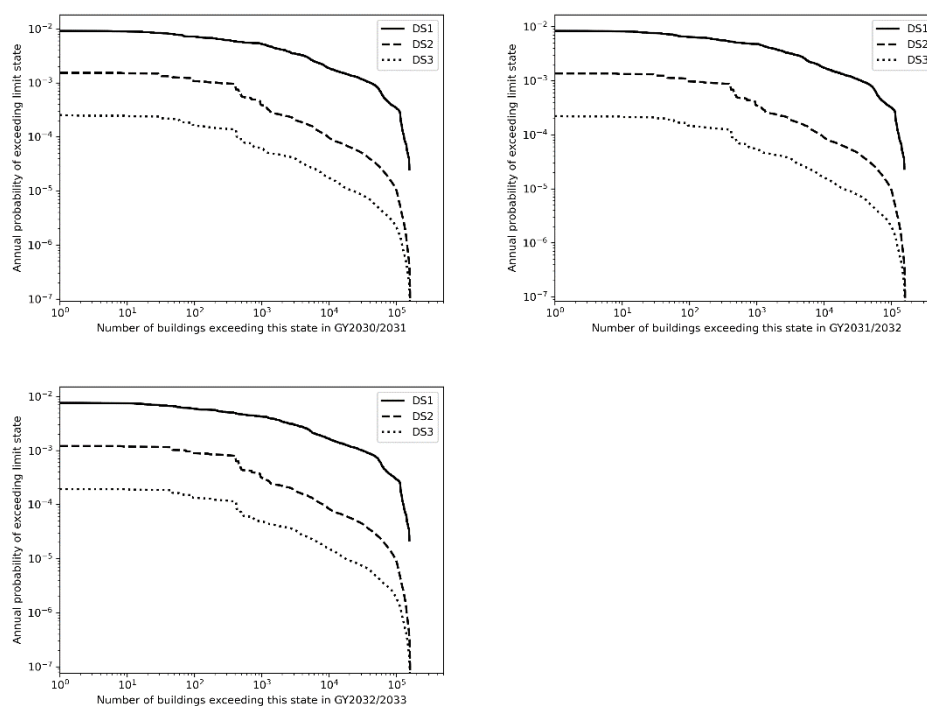
Aangezien voor de hogere schadetoestanden DS2 en DS3 de empirische gegevens ontoereikend zijn, wordt daarvoor gebruik gemaakt van zowel het grondbewegingsmodel als het kwetsbaarheidsmodel die ten grondslag liggen aan de risico-analyse van Hoofdstuk 5.

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 schade prognose voor schadetoestanden DS1 t/m DS3 voor alle gebouwen in de exposure database in de vorm van een jaarlijkse overschrijdingskans van die schadetoestand voor gasjaar 2022/2023 tot en met gasjaar 2032/2033. Tabel 6.1 geeft de verwachtingswaarde van het aantal

gebouwen dat schadetoestand DS1 t/m DS3 jaarlijks overschrijdt als gevolg van het verwachte productieprofiel volgens de GTS-raming 2022.





Figuur 6.1 Jaarlijkse overschrijdingskans voor schadetoestanden DS1 t/m DS3 voor gasjaar 2022/2023 tot en met gasjaar 2032/2033 voor alle gebouwen in de exposure database.

Tabel 6.1 Prognose van het aantal gebouwen dat schadetoestand DS1, DS2 en DS3 overschrijdt per gasjaar.

	Mean DS1 exceedance	Mean DS2 exceedance	Mean DS3 exceedance
GY2022/2023	208	10	2
GY2023/2024	185	9	2
GY2024/2025	168	8	1
GY2025/2026	155	8	1
GY2026/2027	144	7	1
GY2027/2028	135	7	1
GY2028/2029	127	6	1
GY2029/2030	120	6	1
GY2030/2031	115	6	1
GY2031/2032	106	5	1
GY2032/2033	99	5	1

7 Resultaten risicoanalyse cf. laatste wetenschappelijke inzichten van TNO

In Hoofdstuk 2 tot en met 6 worden de uitgangspunten en resultaten van de publieke SDRA Groningen 2022 beschreven.

Dit hoofdstuk beschrijft de resultaten van een risicoanalyse van de voorgestelde operationele strategie voor gasjaar 2022/2023, uitgevoerd met de modelinstellingen zoals geadviseerd door TNO in het Statusrapport (TNO, 2021c). Deze modelinstellingen volgen de meest recente wetenschappelijke inzichten van TNO. Deze aanbevelingen zijn samengevat in sectie 7.1. De resultaten van de dreigings- en risicoanalyse uitgevoerd op basis van aanbevelingen door TNO staan in sectie 7.2.

7.1 Aanbevelingen TNO

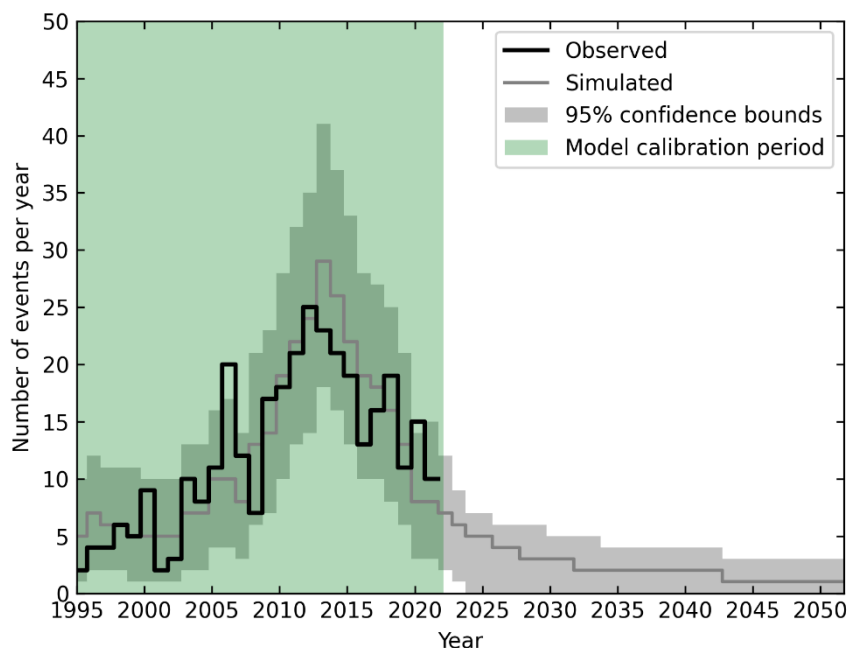
In het door EZK ingerichte proces om tot een keuze voor modelversies te komen heeft TNO in oktober 2021 in het Statusrapport (TNO, 2021c) een advies uitgebracht over de te gebruiken modellen in de SDRA 2022. De modelinstellingen zoals aanbevolen door TNO in het Statusrapport (TNO, 2020c) reflecteren de meest recente wetenschappelijke inzichten volgend uit validatie van de aanbevolen modellen voor gebruik in de publieke SDRA Groningen door TNO:

- TNO-kalibratie van het Seismologisch Bronmodel tot 13 februari 2022 (in plaats van NAM-kalibratie tot 1 januari 2021).
- TNO-implementatie van het Seismologisch Bronmodel versie 6 (SSM-V6) zonder stress-afhankelijke taper in het magnitude-frequentiemodel (weging 0 in de beslisboom in plaats van 0.8, zie Figuur 2.1).
- Grondbewegingsmodel versie 6 (GMM-V6) met het period-to-period correlatiemodel toegepast voor zowel referentiegrondbewegingen als site response (in plaats van alleen op referentieniveau).
- Kwetsbaarheids- en Gevolgmodel versie 7 (FCM-V7) met aangepaste parameter instellingen naar aanleiding van de resultaten van de TNO-typologie aanpak.

Voor wetenschappelijke onderbouwing omtrent deze aanbevelingen en instellingen wordt verwezen naar de rapportage publieke SDRA 2021 Groningen en de referenties daarin (TNO, 2021b). TNO herhaalt haar advies voor herziening van de $M_{\max}$ -verdeling door middel van een deskundigenraadpleging (TNO, 2020d).

7.2 Resultaten uit de aanbevelingen van TNO

In Figuren 7.1-7.5 en Tabellen 7.1-7.2 is te zien dat de seismische activiteit, de kans op zwaardere bevingen, de seismische dreiging, en het seismisch risico van de realisatie op basis van de aanbevelingen door TNO hoger liggen dan volgt uit de voorgeschreven modellen en -instellingen in de SDRA 2022 (Hoofdstukken 3 tot en met 6).



Figuur 7.1 Verwachte seismische activiteit en variatie per gasjaar volgens de aanbevelingen uit sectie 7.1. Zie Figuur 3.1 voor het onderschrift.

De totale verwachte jaarlijkse seismische activiteit volgens de door TNO aanbevolen kalibratie van het Seismologisch Bronmodel is weergegeven in Figuur 7.1, inclusief de historisch waargenomen activiteit. We vergelijken dit met Figuur 3.1 volgens de NAM-kalibratie. De bandbreedte van beide modeluitkomsten verschilt en de twee verwachtingswaarden divergeren in de gasjaren na 2022/2023.

De verschillen tussen beide bronmodel-kalibraties is te duiden aan de hand van het aantal waargenomen bevingen in relatie tot de modelverwachtingen van het aantal bevingen. De uitkomst van deze analyse is recentelijk gedeeld met SodM en EZK in een notitie (TNO, 2022a) en is hieronder samengevat. Die analyse was uitgevoerd met de verwachte seismische activiteit volgens de TNO-aanbeveling uit de rapportage publieke SDRA Groningen 2021 (Figuur 7.1 in TNO, 2021b). De NAM- en TNO-kalibraties zijn uitgevoerd over dezelfde tijdsperiode (tot 1 januari 2021 voor specifiek die analyse).

Over de periode 1994 tot en met 2020 (26 gasjaren) zijn 321 aardbevingen met magnitude 1,5 of hoger geregistreerd. Over dezelfde tijdsperiode worden er 277 aardbevingen voorspeld volgens het SDRA-model met een door NAM uitgevoerde kalibratie van het seismologisch bronmodel (Figuur 3.1). Dit is een onderschatting van 44 bevingen, ofwel 14%. De verwachtingswaarde van het aantal bevingen over dezelfde tijdsperiode uitgevoerd met de TNO-kalibratie van het seismologisch bronmodel is 325 – vier bevingen, ofwel 1%, meer dan geobserveerd. De geobserveerde jaarlijkse seismische activiteit valt binnen de bandbreedte van het TNO-gekalibreerde seismologisch bronmodel (p-waarde = 95%); voor het NAM-gekalibreerde model vallen de geregistreerde bevingen aanzienlijk vaker buiten de modelbandbreedte (p-waarde = 4%). Deze analyse laat zien dat de laatste wetenschappelijke inzichten met betrekking tot de kalibratie van het seismologische

bronmodel aantoonbaar leidt tot een meer betrouwbare voorspelling van het aantal bevingen – gegeven hetzelfde basis SSM.

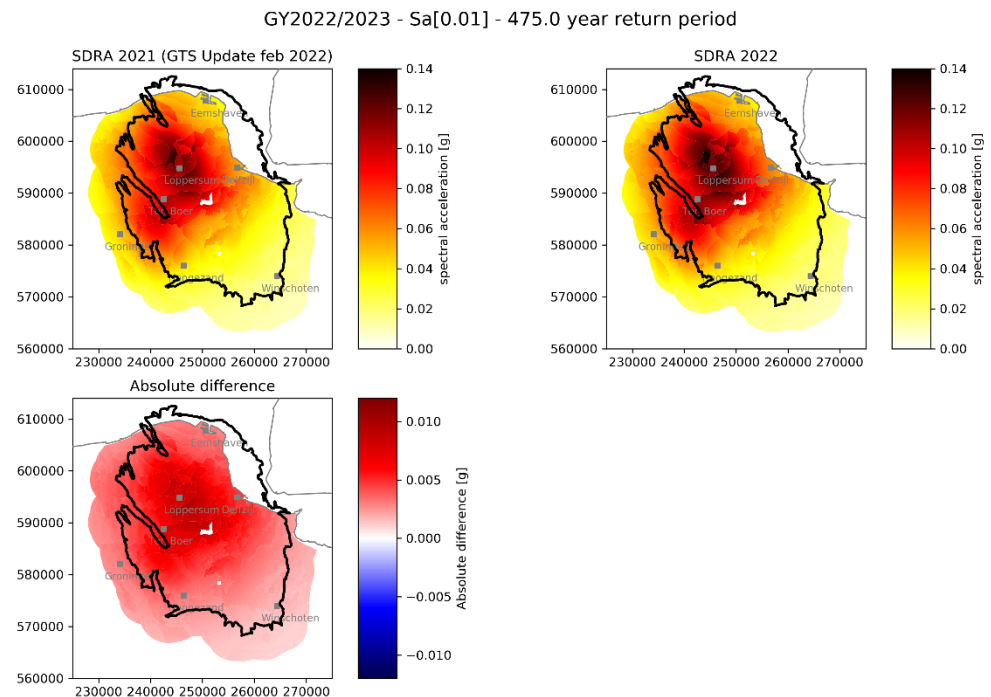
Tabel 7.1 Jaarlijkse verwachting van het aantal bevingen met magnitude gelijk aan of hoger dan M1.5 ("Rate") en overschrijdingskansen volgens de aanbevelingen uit sectie 7.1. Zie Tabel 3.1 voor het onderschrift.

	Rate	M3.5	M3.6	M4.0	M4.5	M5.0
GY2022/2023	5.26	6.11%	4.85%	1.75%	0.34%	0.06%
GY2023/2024	4.67	5.44%	4.31%	1.55%	0.30%	0.06%
GY2024/2025	4.17	4.85%	3.85%	1.38%	0.27%	0.05%
GY2025/2026	3.75	4.37%	3.46%	1.24%	0.24%	0.04%
GY2026/2027	3.40	3.96%	3.14%	1.12%	0.22%	0.04%
GY2027/2028	3.11	3.62%	2.87%	1.02%	0.20%	0.04%
GY2028/2029	2.86	3.32%	2.63%	0.94%	0.18%	0.03%
GY2029/2030	2.64	3.07%	2.43%	0.87%	0.17%	0.03%
GY2030/2031	2.47	2.86%	2.26%	0.81%	0.16%	0.03%
GY2031/2032	2.22	2.58%	2.04%	0.73%	0.14%	0.03%
GY2032/2033	2.04	2.37%	1.87%	0.67%	0.13%	0.02%

De overschrijdingskans van zwaardere bevingen volgens een modelrealisatie op basis van de TNO-aanbevelingen is per gasjaar weergegeven in Tabel 7.1. In vergelijking met de voorgeschreven SDRA-instellingen (Tabel 3.1) valt op dat het aantal bevingen ("Rate") in Tabel 7.1 voor de eerstvolgende drie gasjaren hoger is (periode gasjaar 2022/2023 tot en met 2024/2025) en vervolgens lager (vanaf gasjaar 2025/2026). In gasjaar 2022/2023 verwacht TNO 3,5% meer bevingen dan NAM; in gasjaar 2032/2033 verwacht NAM juist 11,7% meer bevingen dan TNO. Twee oorzaken kunnen dit steeds groter wordend verschil verklaren: (i) een verschillende kalibratie-methode; en (ii) de trainingsperiode voor de TNO-kalibratie van het seismologisch bronmodel is inclusief de bevingen van onder andere M2,5 en M2,2 Zeerijp (op 4 oktober 2021) en M3,2 Garrelsweer (op 16 november 2021).

Ook geeft een vergelijking tussen Tabellen 3.1 en 7.1 weer dat TNO een kleinere kans op M3,5 bevingen verwacht dan NAM en een grotere kans op bevingen van M4,0 en hoger voor alle getoonde gasjaren. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt doordat TNO geen gebruik maakt van de stress-afhankelijke taper in het magnitude-frequentiemodel. Dit taper model reduceert stelselmatig de kans op bevingen van M4,0 en hoger.

Figuur 7.2 illustreert het effect van de TNO-kalibratie van het SSM op de seismische dreiging. Het meewegen van de geobserveerde bevingen in kalenderjaar 2021 in de kalibratie van het seismologisch bronmodel leidt tot een toename van de seismische dreiging. Dit leidt tevens tot een toename van het seismisch risico. Voor gasjaar 2022/2023 leidt dit tot aanzienlijk meer gebouwen die niet aan de veiligheidsnorm voldoen ten opzichte van onze eerdere analyse (TNO, 2022b).

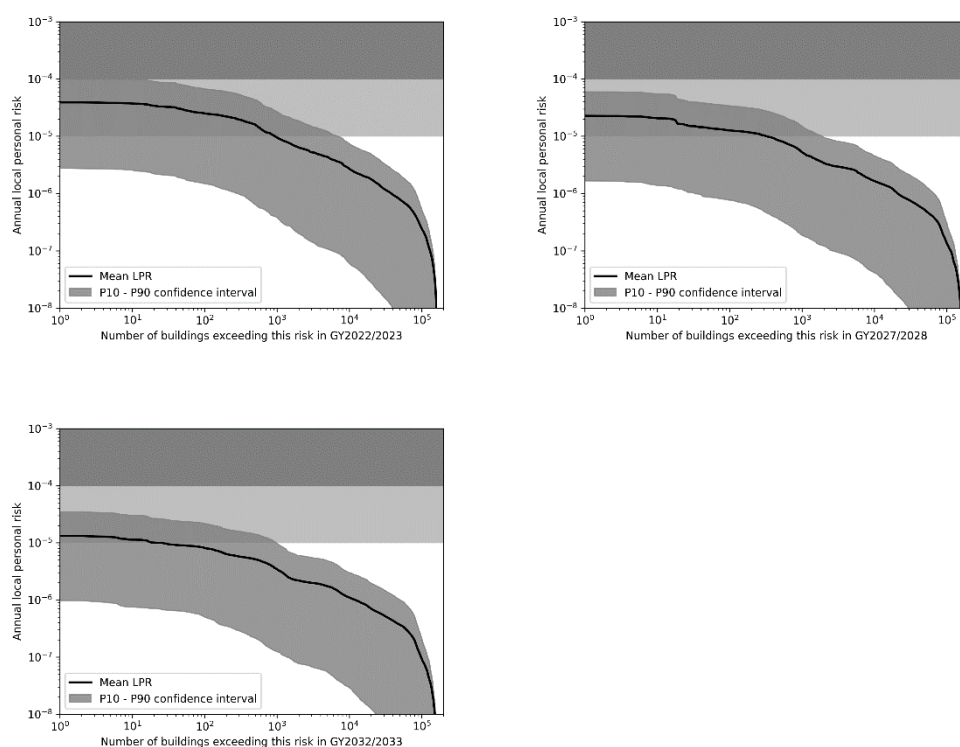


Figuur 7.2 Absolute verschil in jaarlijkse seismische dreiging bij een herhalingsjijd van 475 jaar tussen SDRA 2021 (GTS-update februari 2022; zie TNO (2022b)) en de SDRA 2022 voor gasjaar 2022/2023 volgens de aanbevelingen uit sectie 7.1. De hernieuwde kalibratie van het seismologisch bronmodel leidt tot een toename van de seismische dreiging (tot 0,01 g) over de gehele gemodelleerde invloedssfeer van het Groningenveld.

Figuur 7.3 toont het aantal gebouwen dat een jaarlijkse verwachtingswaarde (*mean*) van het LPR overschrijdt voor de gasjaren 2022/2023, 2027/2028 en 2032/2033 volgens de aanbevelingen uit sectie 7.1. In tegenstelling tot Figuur 5.1 laat Figuur 7.3 zien dat een aanzienlijk aantal gebouwen in het aardbevingsgebied niet aan de Meijdamnorm voldoet: de verwachtingswaarde van het risico voor deze gebouwen is hoger dan 10^{-5} per jaar.

Deze aantallen zijn gekwantificeerd per gasjaar in Tabel 7.2: bijvoorbeeld voor gasjaren 2022/2023, 2027/2028 en 2032/2033 voldoen respectievelijk 930, 320 en 23 gebouwen niet aan de norm volgens uit de risicoberekeningen volgens de TNO-aanbevelingen.

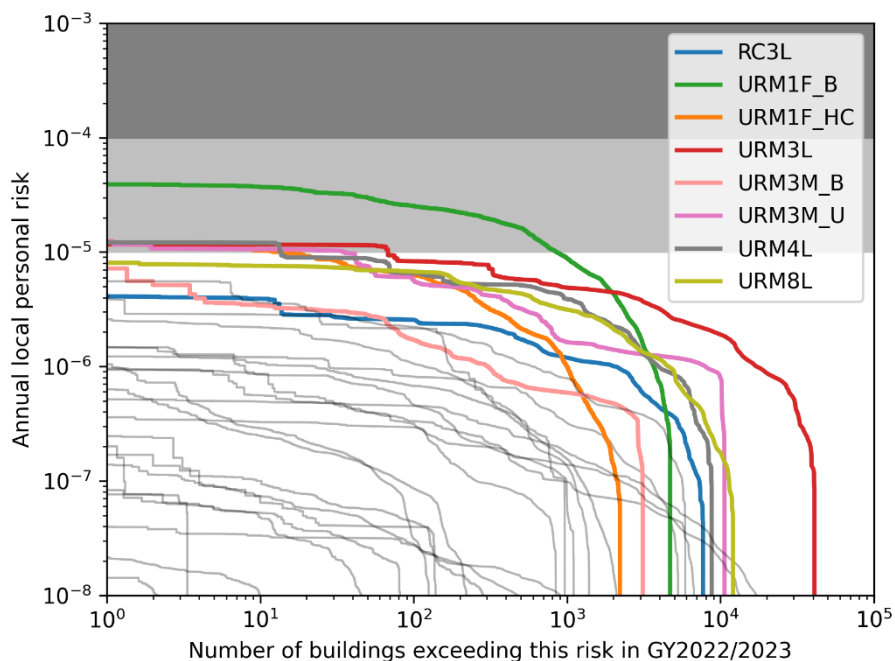
In Figuur 7.4 zien we welke gebouw-typologieën dit omvat: het schuurgedeelte van boerderijen (type URM1F_B) is het meest kwetsbaar, gevolgd door gemetselde rijtjeshuizen met grote gevelopeningen op de begane grond, spouwmuren en betonnen vloeren (typologieën URM4L, URM3M_U en URM3L) en de huisdelen van de boerderijen (type URM1F_HC).



Figuur 7.3 LPR-grafieken voor de gasjaren 2022/2023, 2027/2028 en 2032/2033 volgens de aanbevelingen uit sectie 7.1. Zie figuur 5.1 voor het onderschrift.

Tabel 7.2 Het aantal gebouwen per gasjaar waarvoor de verwachtingswaarde van het LPR niet aan de Meijdamnorm voldoet volgens de aanbevelingen uit sectie 7.1.

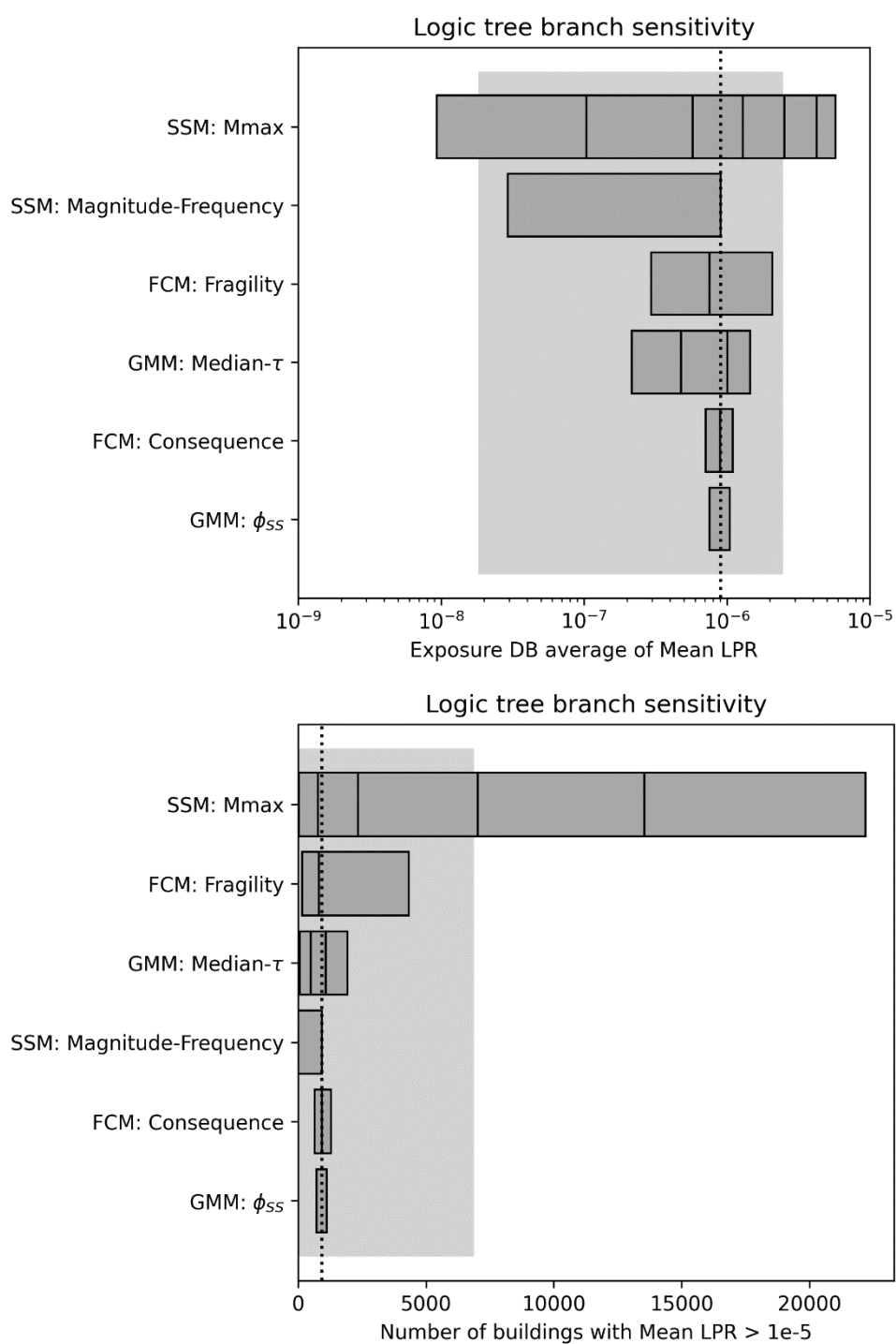
	Mean LPR 1e-4	Mean LPR 1e-5
GY2022/2023	0	930
GY2023/2024	0	748
GY2024/2025	0	619
GY2025/2026	0	539
GY2026/2027	0	439
GY2027/2028	0	320
GY2028/2029	0	221
GY2029/2030	0	140
GY2030/2031	0	95
GY2031/2032	0	41
GY2032/2033	0	23



Figuur 7.4 LPR-grafieken voor gasjaren 2022/2023 volgens de aanbevelingen uit sectie 7.1. Zie figuur 5.2 voor het onderschrift.

Figuur 7.5 geeft de gevoeligheid van risicovoorspellingen per vertakking in de beslisboom weer volgens de aanbevolen modellen en modelinstellingen uit sectie 7.1. Deze beslisboom is vergelijkbaar met Figuur 2.1 zonder het spanningsafhankelijk ζ -model in de magnitude-frequentieverdeling (de MF- ζ vertakking ontbreekt); de overige takken en gewichten zijn identiek, hoewel in de onderliggend submodellen de aanbevelingen van sectie 7.1 zijn doorgevoerd. Zo is voor elke risicofactor en elke tak afzonderlijk het potentiële risico berekend wanneer slechts voor dit vertakkingsniveau en deze tak gekozen zou worden. Vergelijkbaar met Figuur 5.3 is in Figuur 7.5 de spreiding van de gevoeligheid in de $M_{\max}$ -verdeling het grootst, gevolgd door het magnitude-frequentiemodel.

Opgemerkt wordt, dat het gemiddelde van de verwachtingswaarde van het LPR over de gehele gebouwendatabase, dat volgt uit de TNO-aanbevelingen, zo'n factor negen hoger ligt dan volgt uit de voorgeschreven modellen en -instellingen (*average of mean LPR* is $9 \cdot 10^{-7}$ in Figuur 7.5 en $1 \cdot 10^{-7}$ in Figuur 5.3).



Figuur 7.5 Gevoeligheid van het seismisch risico voor epistemische onzekerheden binnen de beslisboom volgens de aanbevelingen uit sectie 7.1. Zie figuur 5.3 voor het onderschrift.

7.3 Conclusies aanbevelingen TNO

Conform de vergelijking van de publieke SDRA Groningen 2022-resultaten volgens de voorgeschreven modellen en -instellingen met de resultaten volgens de aanbevelingen van TNO concluderen we dat:

- Zowel de voorgeschreven trainingsperiode (dat wil zeggen exclusief kalenderjaar 2021) als de gehanteerde methode voor kalibratie van het Seismologisch Bronmodel niet adequaat is.
- Deze opgelegde voorschriften leiden tot een lagere inschatting van de seismische activiteit op korte termijn (tot gasjaar 2024/2025) en een toenemende hogere inschatting van de seismische activiteit op langere termijn (na 2024/2025).
- Deze voorschriften leiden tot een lagere inschatting van de kans op bevingen boven magnitude M4.0.
- Het meewegen van de geobserveerde bevingen in kalenderjaar 2021 leidt (in de TNO-kalibratie) tot een toename van de seismische dreiging over de gehele invloedssfeer van het Groningenveld.
- 930 gebouwen uit de kwetsbaarste typologieën niet aan de Meijdamnorm voldoen.
- Het gemiddelde van de verwachtingswaarde van het Plaatsgebonden Persoonlijk Risico (mean LPR) over de gehele gebouwendatabase een factor negen lager ligt dan volgt uit de aanbevelingen van TNO.

Samenvattend leiden de aanbevelingen van TNO tot een aanzienlijk hoger seismische risico.

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 (2020). Ontwerp-vaststellingsbesluit Groningen gasveld 2020-2021, Kenmerk DGKE-PGG/20086572.
- 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.
- EZK (2022a). Verzoek tot voorstellen operationele strategie voor het gasjaar 2022-2023, Kenmerk DGKE-PDG/22052133.
- GTS (2021). Advies leveringszekerheid voor de benodigde Groningenvolumes en -capaciteiten voor gasjaar 2021/2022 en verder, Kenmerk L 21.0042, 29 januari 2021.
- GTS (2022a). Advies leveringszekerheid voor de benodigde Groningenvolumes en -capaciteiten voor gasjaar 2022/2023 en verder, Kenmerk L 22.0055, 31 januari 2022.
- GTS (2022b). Aanvullend advies om de verhoging van de Groningenproductie in het huidige gasjaar zoveel mogelijk te beperken, Kenmerk L 22.0111, 22 februari 2022.
- KEM (2020). KEM-10 research review, evaluation and interpretation of "Public seismic hazard and risk assessment model Groningen 2018-2019".
- KNMI (2022). <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).
- NAM (2021). Prognosis of DS1–Building Damage Groningen Field update for Production Profile GTS-raming 2021.
- 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 (2021a). Proposed research activities for model development in the public SHRA Groningen, TNO 2021 R10153, 20 januari 2021.
- TNO (2021b). Publieke SDRA Groningen 2021. TNO 2021 R10441, 24 maart 2021.
- TNO (2021c). Status of the TNO Model Chain Groningen per October 1, 2021 and recommendations for the public Seismic Hazard and Risk Analysis 2022. TNO 2021 R11742, 15 oktober 2021.
- TNO (2021d). Public SHRA Groningen development plan 2022, TNO 2021 R12364, 15 december 2021.
- TNO (2022a). Analyse aantal waargenomen bevingen in Groningen in relatie tot modelverwachting en de rol van modelkalibratie. TNO-AGE 22-10.003, 14 januari 2022.
- TNO (2022b). Publieke Seismische Dreigings- en Risicoanalyse Groningen gasveld; Herziene operationele strategie gasjaar 2021/2022 – Addendum GTS update februari 2022, TNO 2022 R10431, 14 maart 2022.
- Tessella (2020). Software review report TNO PSHRA Software Assessment SodM.

9 Ondertekening

Utrecht, 25 maart 2022

TNO

Drs. J.A.J. Zegwaard
Afdelingshoofd Advies Groep Economische Zaken

Appendix A – Disaggregatie van dreiging

A.1 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 (grotfweg) 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 we ook de ruimtelijke verdeling van de uitsplitsing voor de drie genoemde bijdragen over het gehele Groningenveld.

Figuur A.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 A.2 geeft eenzelfde uitsplitsing weer voor Loppersum.

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

In Figuur A.1 (linker kolom, 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 A.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) in de regio Ten Boer/Eemskanaal-cluster. Dit komt overeen met de ruimtelijke spreiding van dreiging in Figuur 4.1.

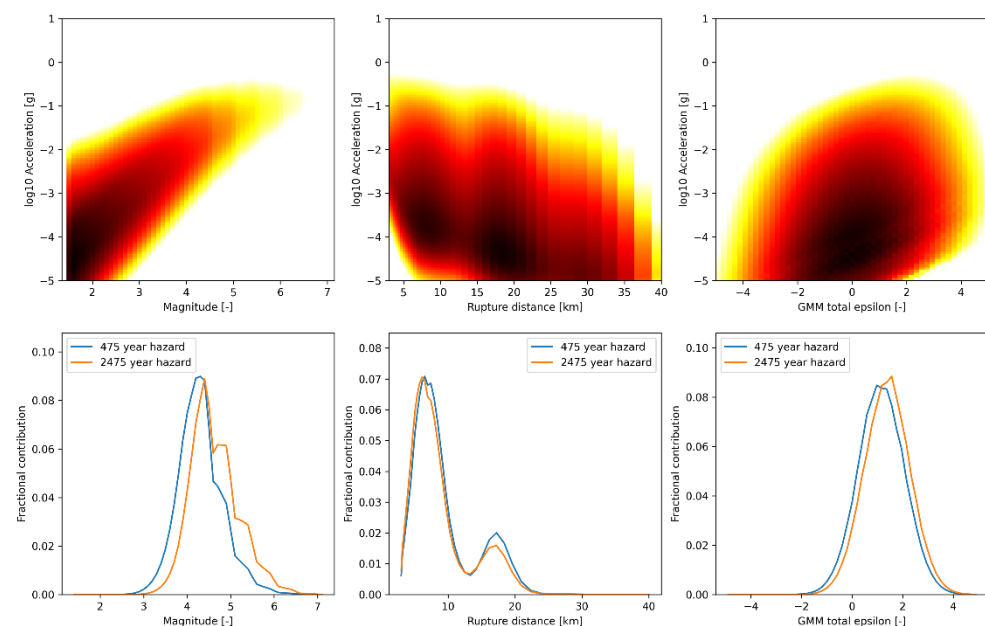
Als laatste is de verwachte bijdrage van de grondbewegingsvariabiliteit op de seismische dreiging berekend. Figuur A.1 (rechter kolom) laat zien dat de dominante bijdrage aan overschrijdingen wordt geleverd door grondbewegingen die bovengemiddeld sterk zijn ten opzichte van de verwachte waarde bij gegeven

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

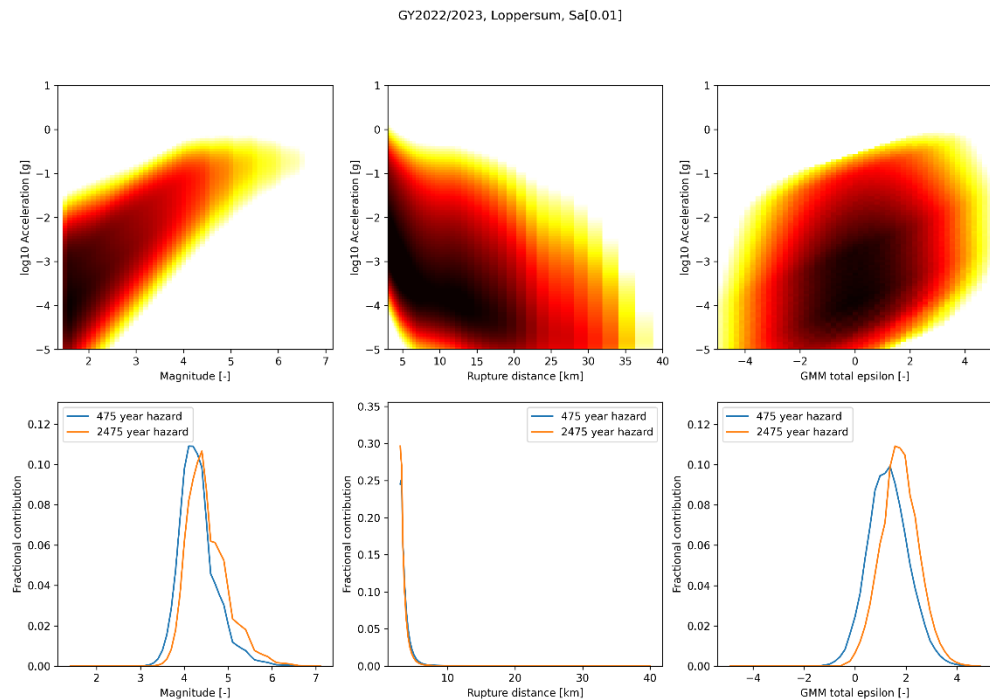
Samengevat demonstreert Figuur A.1 dat voor Groningen (stad) de marginale dreigingsbijdragen gegeven worden door een modale magnitude van 4.5, een primaire modale breukafstand van 7 km, een secundaire modale breukafstand van 18 km en een modale grondbewegingsvariabiliteit van 1 standaarddeviatie boven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

Figuur A.2 geeft eenzelfde disaggregatie weer van de seismische dreiging voor het dorp Loppersum. Volgens een vergelijkbare uitleg als hierboven voor Groningen (stad) demonstreert Figuur A.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, 2022), 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.

GY2022/2023, Groningen, Sa[0.01]



Figuur A.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 2022/2023. 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 2022.



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

A.2 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 A.3 laat zien hoe deze drie modale bijdragen aan de seismische dreiging variëren over het gehele aandachtsgebied. Een herhalingsstijd van 475 jaar komt overeen met een overschrijdingskans van 0,2105% per jaar. Een herhalingsstijd van 2475 jaar komt overeen met een overschrijdingskans van 0,0404% per jaar.

Samenvattend voor de seismisch 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 g.

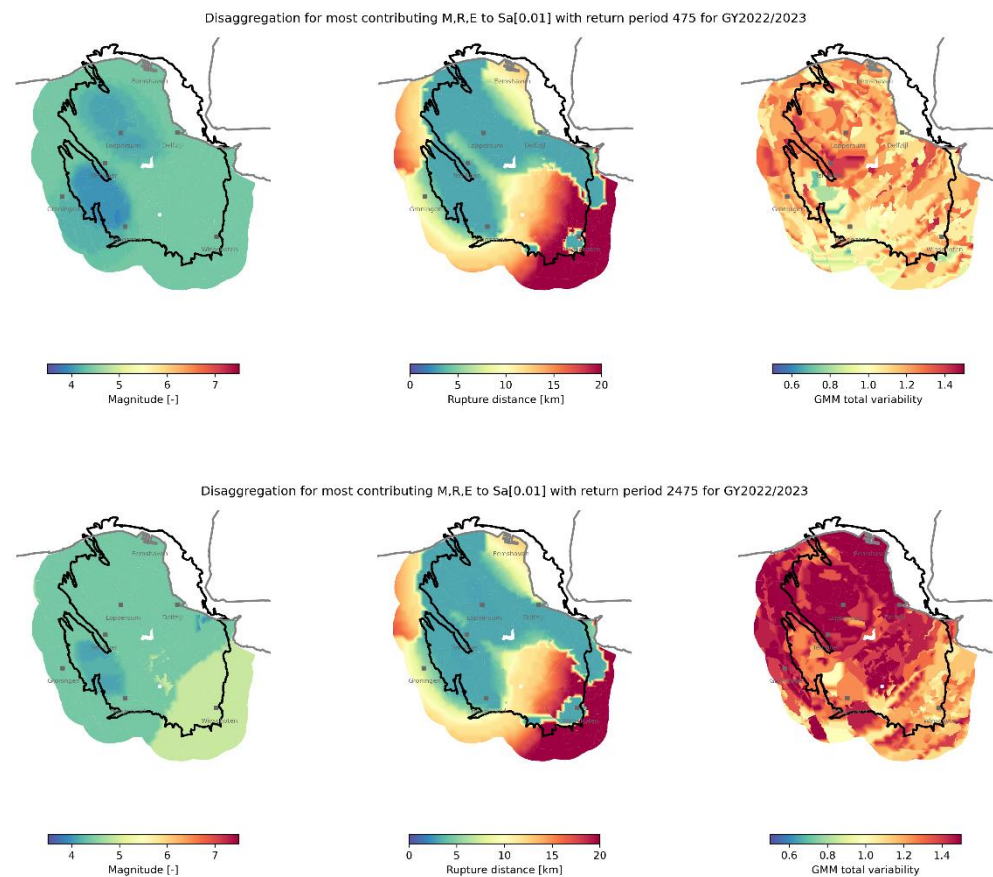
In Figuur A.3 zien we dat de modale magnitude van 3,9 tot 4,2 een dominante bijdrage aan de seismische dreiging levert op plaatsen direct boven gebieden met een hogere aardbevingsdichtheid (zie ook Figuur 3.2), zoals rond Loppersum. In het zuidwesten van het gebied neemt dit toe tot magnitude 4,5. In 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 aandachtsgebied 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 A.3 laat zien dat de ruimtelijke uitsplitsing van de bijdragen aan de dreiging in het aardbevingsgebied gegeven wordt door een primaire modale magnitude van 4.0 en een primaire modale breukafstand van 3 km verdeeld over twee aardbevingshaarden: één noordwest-zuidoost over de Loppersumregio en één gebied in de regio ten zuiden van Ten Boer/Eemskanaal cluster.



Figuur A.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 herhalingsijd van 475 jaar (bovenste rij) en 2475 jaar (onderste rij).

Appendix B – Disaggregatie van risico

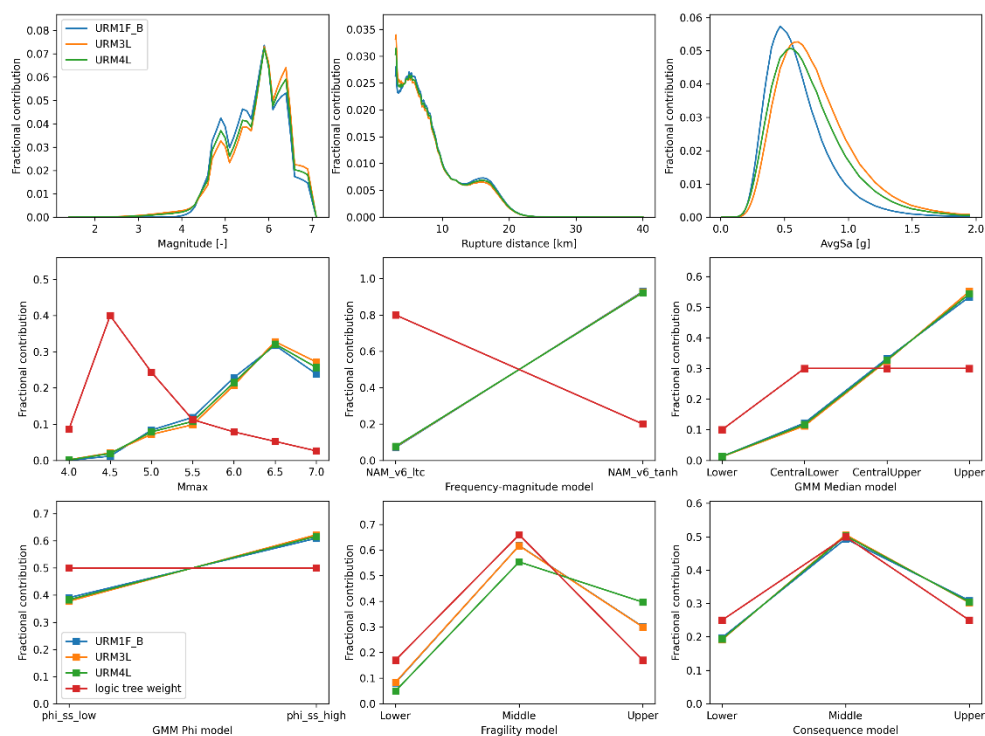
B.1 Disaggregatie van het risico voor geselecteerde typologieën

Vergelijkbaar met de disaggregatie van de seismische dreiging (Appendix A) 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 B.1 en B.2 laten de resultaten van de uitsplitsing van risicobijdrage zien voor Groningen (stad) en Loppersum, respectievelijk. Voor Groningen (stad) laat Figuur B.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.

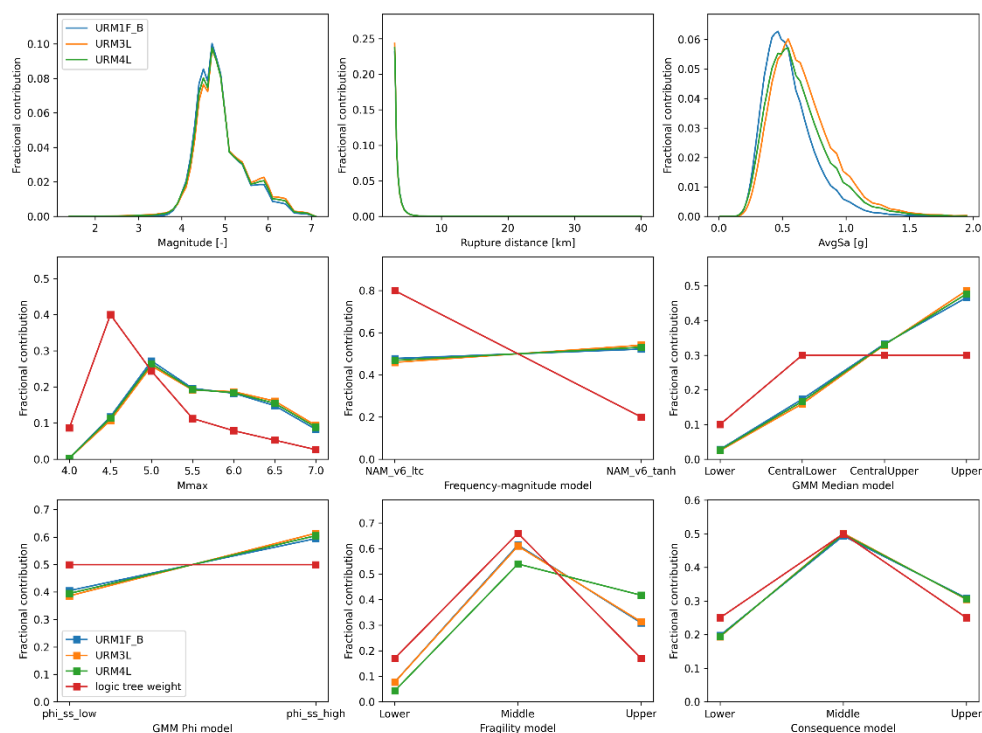
Figuur B.2 toont de resultaten van de uitsplitsing van risicobijdrage voor Loppersum. Voor alle drie de typologieën is de marginale bijdrage van magnitudes aan het gemiddelde LPR bimodaal met de primaire modus op $M = 4.7$ en de secundaire modus op $M = 4.5$. Dit wordt geïnterpreteerd als het gevolg 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 Figuren B.1 en B.2. De verdelingen van de gemiddelde PSA-risicobijdragen vertonen allemaal een goed gedefinieerde modus bij ongeveer 0.5 g.

GY2022/2023, Groningen



Figuur B.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 2022/2023 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.

GY2022/2023, Loppersum

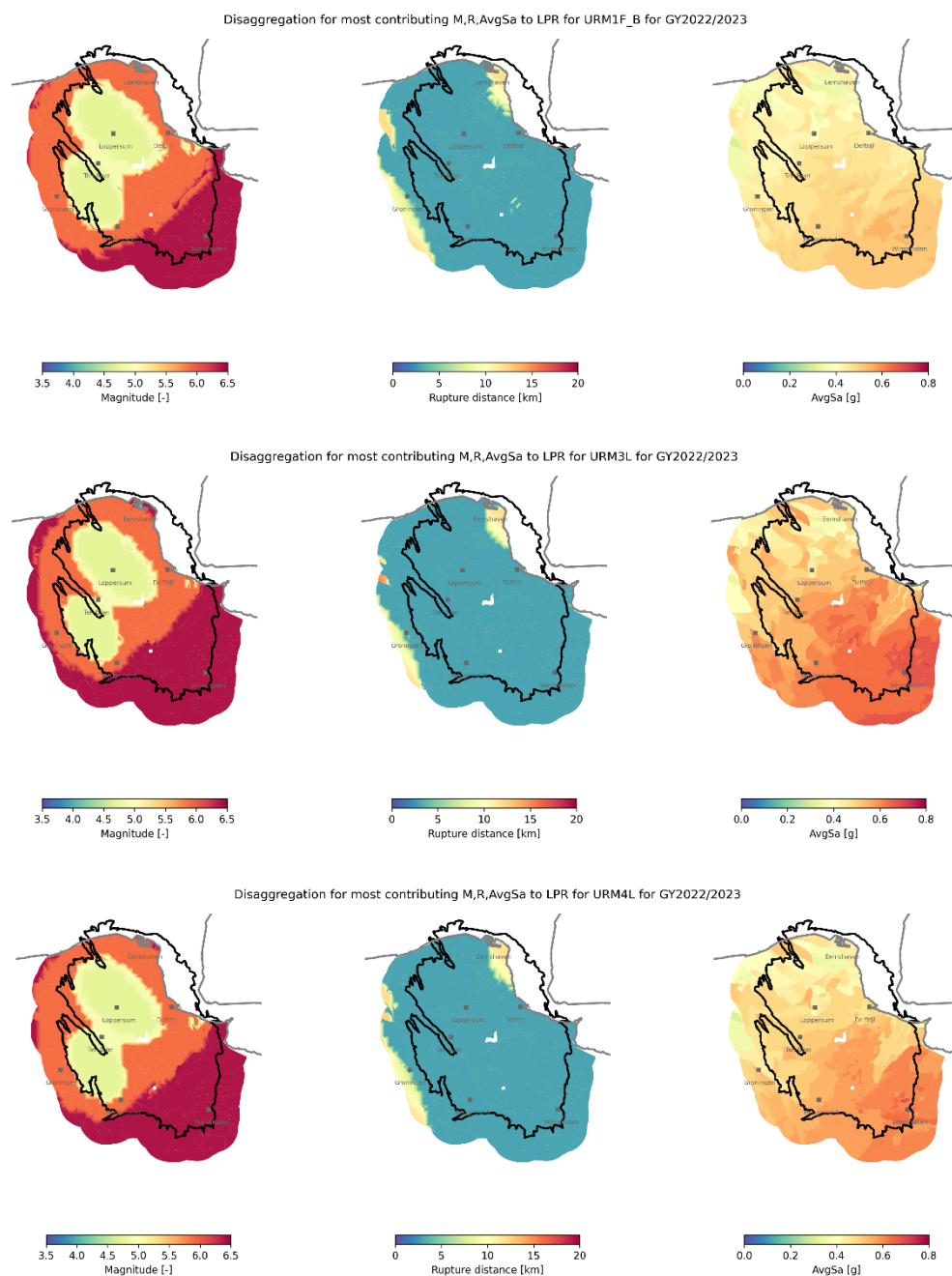


Figuur B.2 Disaggregatie van het seismisch risico voor Loppersum. Onderschrift als in Figuur B.1.

B.2 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 B.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 het 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/Eemskanaal productiecluster. 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 B.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 C – Afwijkende risicomaat

In Tabel C.1 is voor de P90 van het LPR het aantal gebouwen weergegeven dat per gasjaar niet aan de Meijdamnorm voldoet.

Tabel C.1 Het aantal gebouwen per gasjaar waarvoor de afwijkende risicomaat P90 van het LPR niet aan de tijdelijke norm (10^{-4}) en Meijdamnorm (10^{-5}) voldoet.

	P90 LPR $1e-4$	P90 LPR $1e-5$
GY2022/2023	0	16
GY2023/2024	0	13
GY2024/2025	0	5
GY2025/2026	0	0
GY2026/2027	0	0
GY2027/2028	0	0
GY2028/2029	0	0
GY2029/2030	0	0
GY2030/2031	0	0
GY2031/2032	0	0
GY2032/2033	0	0