

Publieke Seismische Dreigings- en Risicoanalyse Groningen gasveld 2023

TNO 2023 R10682 – 7 april 2023
Publieke Seismische Dreigings- en Risicoanalyse
Groningen gasveld 2023

Auteurs	Auteur(s)
Rubricering rapport	TNO Publiek
Rapporttekst	TNO Publiek
Bijlagen	TNO Publiek
Oplage	
Aantal pagina's	58 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	4
Opdrachtgever	Ministerie van Economische Zaken en Klimaat
Projectnaam	publieke SDRA Groningen

Alle rechten voorbehouden

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

© 2023 TNO

Samenvatting

Publieke SDRA 2023

De publieke Seismische Dreigings- en Risicoanalyse Groningen (SDRA) geeft een verwachting van toekomstige seismiciteit, seismische groundbewegingen, gebouwschade, en het veiligheidsrisico voor de bewoners in het Groningse aardbevingsgebied als gevolg van de gaswinning. Dit rapport beschrijft de publieke SDRA 2023. Hierin zijn op basis van twee operationele strategieën (waarvan één met twee varianten) de drie door NAM voorgestelde productiescenario's (1, 2a en 2b) doorberekend voor gasjaar 2023/2024 en verder.

Doel van de dreigingsanalyse

De seismische dreigingsanalyse berekent de in ruimte en tijd variërende verwachting van de groundbewegingsintensiteit 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 gebouwen, infrastructuur en 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 groundbewegingen 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) om de publieke SDRA Groningen uit te voeren. Hiertoe heeft TNO de Modelketen Groningen geïmplementeerd. 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 2023

- › 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 aantal verwachte bevingen (met een magnitude gelijk aan of hoger dan 1,5) daalt ook de komende tien jaar van 5 à 6 bevingen in gasjaar

2023/2024 tot minder dan 2 bevingen in gasjaar 2033/2034 als gevolg van de verwachte insluiting van het Groningenveld.

- › Het hoogste aantal bevingen per vierkante kilometer ligt ook de komende jaren in de regio Loppersum en rond het Eemskanaal-productiecluster.
- › De maximale dreiging in termen van piekgrondversnelling (PGA) bij 475 jaar herhalingstijd bedraagt 0,13 g in het gasjaar 2023/2024. Deze neemt geleidelijk af tot 0,10 g in het gasjaar 2028/2029 en verder tot ~0,075 g in het gasjaar 2033/2034.
- › Afhankelijk van het gekozen productie scenario voldoen tussen de 18 en 23 gebouwen in het aardbevingsgebied niet aan de Meijdamnorm in gasjaar 2023/2024.
- › Samen met het dalend aantal bevingen nemen ook de seismische dreiging, het persoonlijk risico en de kans op schade jaarlijks af.

Resultaten risicoanalyse cf. laatste wetenschappelijke inzichten van TNO

Voor het uitvoeren van de SDRA 2023 heeft EZK mede op advies van het Staatstoezicht op de Mijnen voorgeschreven welke modelcomponenten, modelinvoer, en aannames dienen te worden gebruikt. Deze voorschriften wijken op enkele punten af van de aanbevelingen van TNO in het Statusrapport 2022 conform de meest recente wetenschappelijke inzichten van TNO. Vergeleken met de berekeningen volgens de voorschriften van EZK leiden de berekeningen op basis van de aanbevelingen van TNO tot een aanzienlijk hogere verwachtingswaarde van het persoonlijk risico. Afhankelijk van het gekozen productiescenario leiden de berekeningen op basis van de aanbevelingen van TNO in totaliteit tot 415 tot 520 gebouwen die niet aan de Meijdamnorm voldoen voor het gasjaar 2023/2024. Het schuurgedeelte van boerderijen is het meest kwetsbare huizentype, gevolgd door gemetselde rijtjeshuizen met spouwmuren, betonnen vloeren, en grote openingen in de gevelwanden op de begane grond.

Summary

Public SHRA 2023

The public Seismic Hazard and Risk Analysis (SHRA) Groningen provides an expectation of the future seismicity, seismic ground motions, building damage, and the safety risk for residents in the Groningen earthquake area as a result of the gas extraction. This report describes the public SHRA 2023. It contains the results of the SHRA calculations for gas year 2023/2024 and beyond, based on three production scenarios (1, 2a and 2b) proposed by NAM, which are in turn based on the two operational strategies (with one variation).

Scope of the hazard analysis

The seismic hazard analysis calculates the spatially and temporally 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. 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 2023

-) 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 (with a magnitude of 1.5 or above) decreases in the coming ten years from 5 to 6 events in gas year

2023/2024 to less than 2 events in gas year 2033/2034 as a result of the expected closure of the Groningen field.

- › The largest number of events per square kilometers remain in the regions Loppersum and Ten Boer/Eemskanaal-cluster in the coming years.
- › The maximum hazard in terms of peak ground acceleration (PGA) with a 475-year return period is 0.13 g in gas year 2023/2024 and decreases to 0.10 g in gas year 2028/2029 and further to ~0.075 g in gas year 2033/2034.
- › Depending of the production scenario, between 18 and 23 buildings have an LPR value that exceeds the Meijdam norm in the gas year 2023/2024.
- › 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.

Result cf. scientific recommendations TNO

For the execution of the public SDRA 2023, EZK has (based on, among others, the advice by State Supervision of Mines) prescribed which model settings, model inputs, and model assumptions are to be used. The prescriptions differ on a number of important points from the recommendation made by TNO in their Status Report 2022, which were made based on the most recent scientific insights by TNO. Compared to the calculations based on the prescriptions by EZK, the calculation based on the recommendations by TNO lead to significantly higher expectation values of personal risk. Depending on the production scenario, the calculations based on the recommendations by TNO result in a total of 415 to 520 buildings that do not meet the Meijdam norm in the gas year 2023/2024. The building type that is most commonly found to not meet the Meijdam norm is the barn section of farms, followed by terraced masonry houses with cavity walls, concrete floors and large ground floor facade openings.

Inhoudsopgave

Samenvatting	3
Summary	5
Inhoudsopgave	7
1 Inleiding	9
1.1 Veiligheid van de bewoners	9
1.2 Hoofdonderdelen van de SDRA	9
1.3 Indeling SDRA-rapport	10
2 Uitgangspunten modelberekeningen	11
2.1 Scenario's verwachtingenbrief	11
2.2 Extern aangeleverde gegevens	11
2.3 EZK-modelinstellingen	11
3 Analyse scenario 1	13
3.1 Seismiciteit scenario 1	13
3.2 Seismische dreiging scenario 1	16
3.3 Seismisch risico scenario 1	17
3.4 Schade prognose scenario 1	19
4 Analyse scenario 2a	22
4.1 Seismiciteit scenario 2a	22
4.2 Seismische dreiging scenario 2a	25
4.3 Seismisch risico scenario 2a	25
4.4 Schade prognose scenario 2a	28
5 Analyse scenario 2b	30
5.1 Seismiciteit scenario 2b	30
5.2 Seismische dreiging scenario 2b	33
5.3 Seismisch risico scenario 2b	33
5.4 Schade prognose scenario 2b	36
6 Synthese resultaten	38
6.1 Vergelijking scenario 1, 2a & 2b	38
6.2 Vergelijking SDRA 2022	39
6.3 Analyse van epistemische onzekerheden	39
7 Resultaten risicoanalyse cf. laatste wetenschappelijke inzichten van TNO	41
7.1 Aanbevelingen TNO	41
7.2 Resultaten risicoanalyse TNO aanbevelingen	42
7.3 Analyse van epistemische onzekerheden	44
7.4 Conclusies aanbevelingen TNO	46
Referenties	47
Ondertekening	48

Bijlagen

Bijlage A:	Disaggregatie van dreiging	50
Bijlage B:	Disaggregatie van risico	54
Bijlage C:	Afwijkende risicomaat	58
Bijlage D:	Lange termijnontwikkeling	59

1 Inleiding

1.1 Veiligheid van de bewoners

De geïnduceerde aardbevingen door gasproductie uit het Groningenveld zijn het gevolg van onregelmatige inzakking (compactie) van gashoudende gesteentelagen aan weerszijden van reeds aanwezige breuken. Als de spanning op een breuk een kritische waarde overschrijdt, kan breukreactivatie leiden tot een aardbeving. Het verwachte aantal en de zwaarte van de bevingen is een maat voor de verwachte bevingsintensiteit. De seismische dreigings- en risicoanalyse (SDRA) Groningen brengt de dreiging en het veiligheidsrisico voor de bewoners in het aardbevingsgebied in kaart.

1.2 Hoofdonderdelen van de SDRA

De publieke SDRA Groningen bestaat uit een analyse van de seismiciteit, seismische dreiging, seismisch risico en een schadeprognose:

- › De analyse van de seismiciteit (seismische activiteit en variabiliteit) geeft een overzicht van de historisch waargenomen bevingen, de totale verwachte hoeveelheid bevingen, de kans op zwaardere bevingen en de verwachte ruimtelijke verdeling per jaar.
De historisch waargenomen en verwachte seismische activiteit en aardbevingsdichtheid geven inzicht in de mate waarin verminderde gaswinning in Groningen leidt tot een afname van de seismiciteit en veranderingen in de ruimtelijke verdeling.
- › De seismische dreiging berekent de ruimtelijke verdeling van de verwachte grondbewegingsintensiteit aan het aardoppervlak als gevolg van geïnduceerde bevingen. Dreiging wordt uitgedrukt in termen van de intensiteit van de seismische grondbeweging behorende bij een bepaalde herhalingstijd.
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.
- › Het seismisch risico is een inschatting van het Plaatsgebonden Persoonlijk risico (LPR – *Local Personal Risk*): 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.
De seismische risicoanalyse combineert de verwachtingen voor de grondbewegingen met een inschatting van de kwetsbaarheid van de gebouwvoorraad in de regio. De jaarlijkse kans op overlijden kan vervolgens getoetst worden aan de vastgestelde veiligheidsnorm (de Meijdamnorm) om te komen tot een veiligheidsbeoordeling.
De Nationaal Coördinator Groningen (NCG) vertaalt de uitkomsten van de risicoanalyse naar gebouwen op adresniveau, zodat die informatie kan worden gebruikt voor prioritering van de versterking van de meest kwetsbare gebouwen.
- › De schadeprognose is een berekening van de verwachte schade aan gebouwen als direct gevolg van de geïnduceerde bevingen.

1.3 Indeling SDRA-rapport

De twee operationele strategieën (drie scenario's), uitgangspunten, invoergegevens en de te hanteren modelversies zijn samengevat in Hoofdstuk 2. Een apart hoofdstuk geeft per scenario de resultaten voor de verwachte seismische activiteit, dreiging, risico en schade. Deze analyses staan in de Hoofdstukken 3, 4 en 5 voor de verschillende drie scenario's. Hoofdstuk 6 geeft een synthese van de drie scenario's. Hoofdstuk 7 behandelt de resultaten volgens de aanbevelingen van TNO conform haar meest recente wetenschappelijke inzichten.

2 Uitgangspunten modelberekeningen

2.1 Scenario's verwachtingenbrief

Conform de Mijnbouwwet heeft het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK) veldoperator NAM verzocht om twee operationele strategieën (waarvan één met twee varianten) voor het gasjaar 2023/2024 (en verder) voor te stellen (EZK, 2023):

- › In scenario 1 wordt het Groningenveld per 1 oktober 2023 gesloten.
- › In scenario 2a wordt het Groningenveld geproduceerd op waakvlamniveau conform de GTS-raming voor gasjaar 2023/024 met elf productielocaties (GTS, 2023).
- › Scenario 2b is als scenario 2a met vijf productielocaties in plaats van elf.

Conform de Mijnbouwregeling moet ter onderbouwing van een operationele strategie een dreigings- en risicoanalyse worden opgenomen. EZK (2023) heeft TNO de opdracht gegeven de publieke SDRA 2023 uit te voeren. De Mijnbouwregeling schrijft voor welke onderdelen dienen te worden opgenomen in de SDRA. Deze onderdelen zijn berekend met de TNO Modelketen Groningen met de door de opdrachtgever voorgeschreven invoergegevens en modelversies in de Verwachtingenbrief (EZK, 2023) en met aanbevelingen volgens de wetenschappelijke inzichten van TNO (2022a).

2.2 Extern aangeleverde gegevens

De TNO modelketen Groningen maakt gebruik van externe aangeleverde invoergegevens en informatie:

- › Reservoirdrukken per gasjaar (NAM). Dit omvat onder andere ook de historische en toekomstige reservoirporiëndruk behorende bij de operationele strategieën op basis van de GTS-ramingen 2023.
- › Aardbevingscatalogus (KNMI).
- › De herziene Mmax-verdeling uit de deskundigenworkshop van juni 2022 (NAM, 2022).
- › Een extractie van de Gebouwendatabase, EDB 2023 van januari 2023 (EZK).

2.3 EZK-modelinstellingen

Op verzoek van EZK (2023) is de publieke SDRA 2023 uitgevoerd met de volgende kalibratieprocedure en modellen:

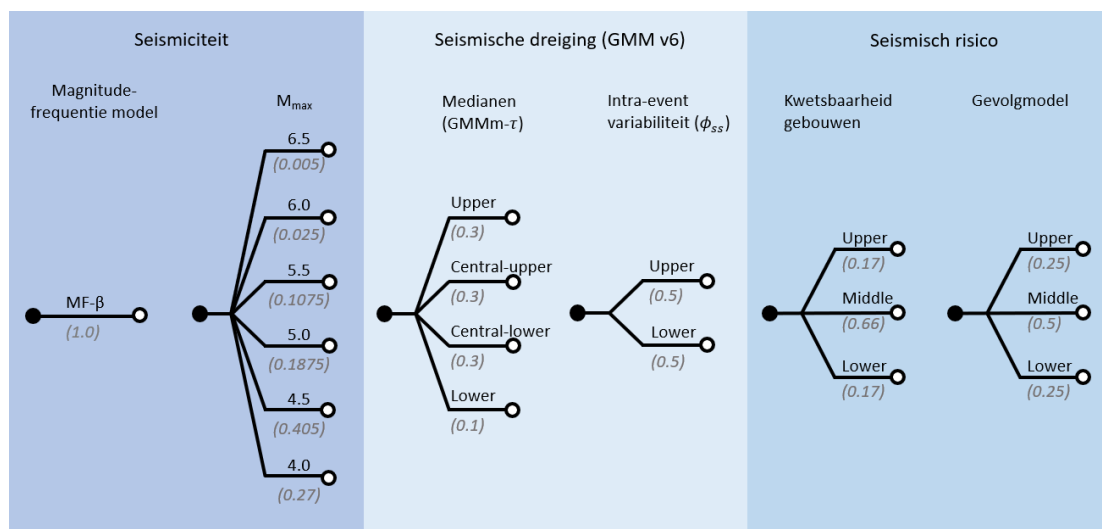
- › TNO-kalibratie en implementatie van het Seismologisch Bronmodel SSM v6
- › Coulomb stress-afhankelijke b-waarde Magnitude-Frequentie model (exclusief stress-afhankelijke taper).
- › Grondbewegingsmodel GMM v6
- › Kwetsbaarheids- en Gevolgmodel FCM v7 zoals voorgeschreven in de SDRA voor gasjaar 2022/2023 (EZK, 2022).

In aanvulling hierop zijn de volgende uitgangspunten gebruikt waar er in de verwachtingsbrief geen expliciete keuze gemaakt wordt:

- De kalibratie van het Seismologisch Bronmodel SSM v6 is uitgevoerd met trainingsperiode 1995-01-01 tot 2023-02-28.
- Grondbewegingsmodel v6 is gebruikt met het period-to-period correlatiemodel toegepast op zowel referentieniveau als in de site response. Hier is de TNO aanbeveling gevolgd. Deze keuze wordt mede ondersteund door Grondbewegingsmodel V7, waarin de spectrale periodes in het ondiepe deel volledig gecorreleerd zijn.
- Voor de schadeprognose is gebruik gemaakt van geactualiseerde Empirische GMPE voor PGV (Bommer, 2021)

De resultaten in Hoofdstukken 3, 4 en 5 zijn gebaseerd op deze instellingen.

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. De uitvoer van de TNO Modelketen (de verwachtingswaarde van het Plaatsgebonden Persoonlijk Risico) representeert alle epistemische onzekerheden die zijn vastgelegd in de beslisboom. De beslisboom voor de publieke SDRA 2023 is gegeven in [Figuur 2.1](#).



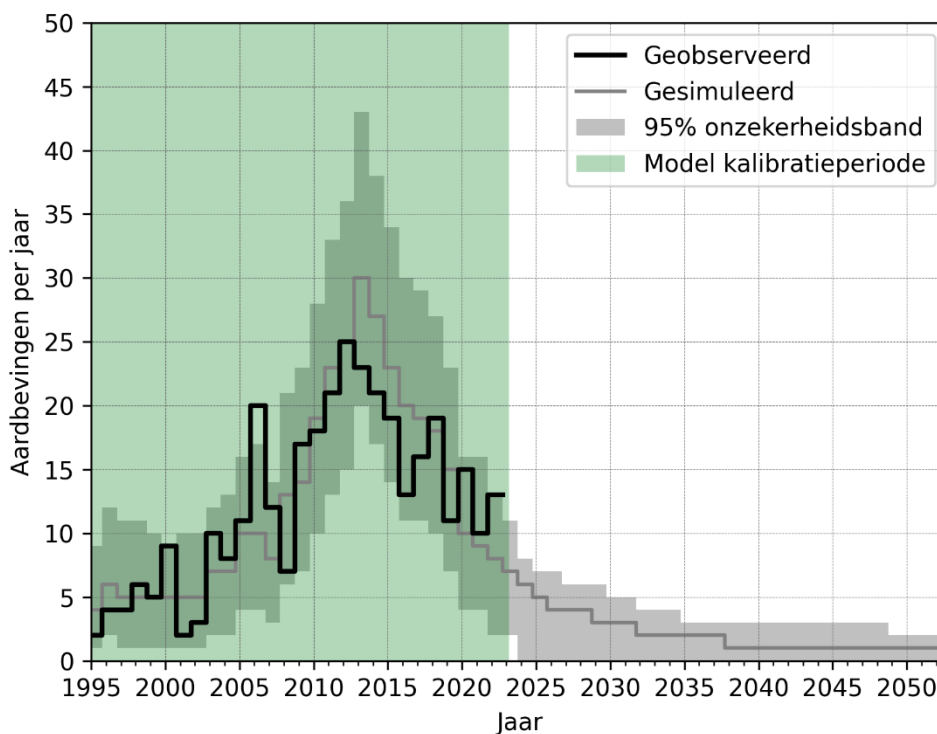
Figuur 2.1: Structuur, waarden en gewichten van de beslisboom (logic tree) voor de publieke SDRA 2023 volgens de EZK-instellingen. De M_{\max} -aardbevingsmagnitudes en -gewichten zijn herzien ten opzichte van de vorige verdeling (NAM, 2022). GMM- τ staat voor het grondbeweging mediaan- τ -model. GMM- ϕ_{ss} is het grondbeweging variabiliteit ϕ_{ss} -model. Het risico wordt bepaald door het Kwetsbaarheidsmodel van de gebouwen en het Gevolgmodel (kans op overlijden). Het gewicht per tak staat tussen haakjes.

3 Analyse scenario 1

Het uitgangspunt voor scenario 1 is een volledige sluiting van het Groningenveld per 1 oktober 2023.

3.1 Seismiciteit scenario 1

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 2052. Het aantal bevingen laat een dalende trend zien sinds 2012. Dit is het gevolg van een afnemende gaswinning sinds 2014. Vanaf 2023 wordt een verdere daling van het aantal bevingen verwacht als gevolg van het insluiten van het Groningenveld.



Figuur 3.1: Verwachte seismische activiteit en variatie per gasjaar voor scenario 1. Op de horizontale as staat het kalenderjaar (bereik 1 januari 1995 tot 1 oktober 2052). 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 per gasjaar in het verleden weer tot 1 oktober 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 28 februari 2023.

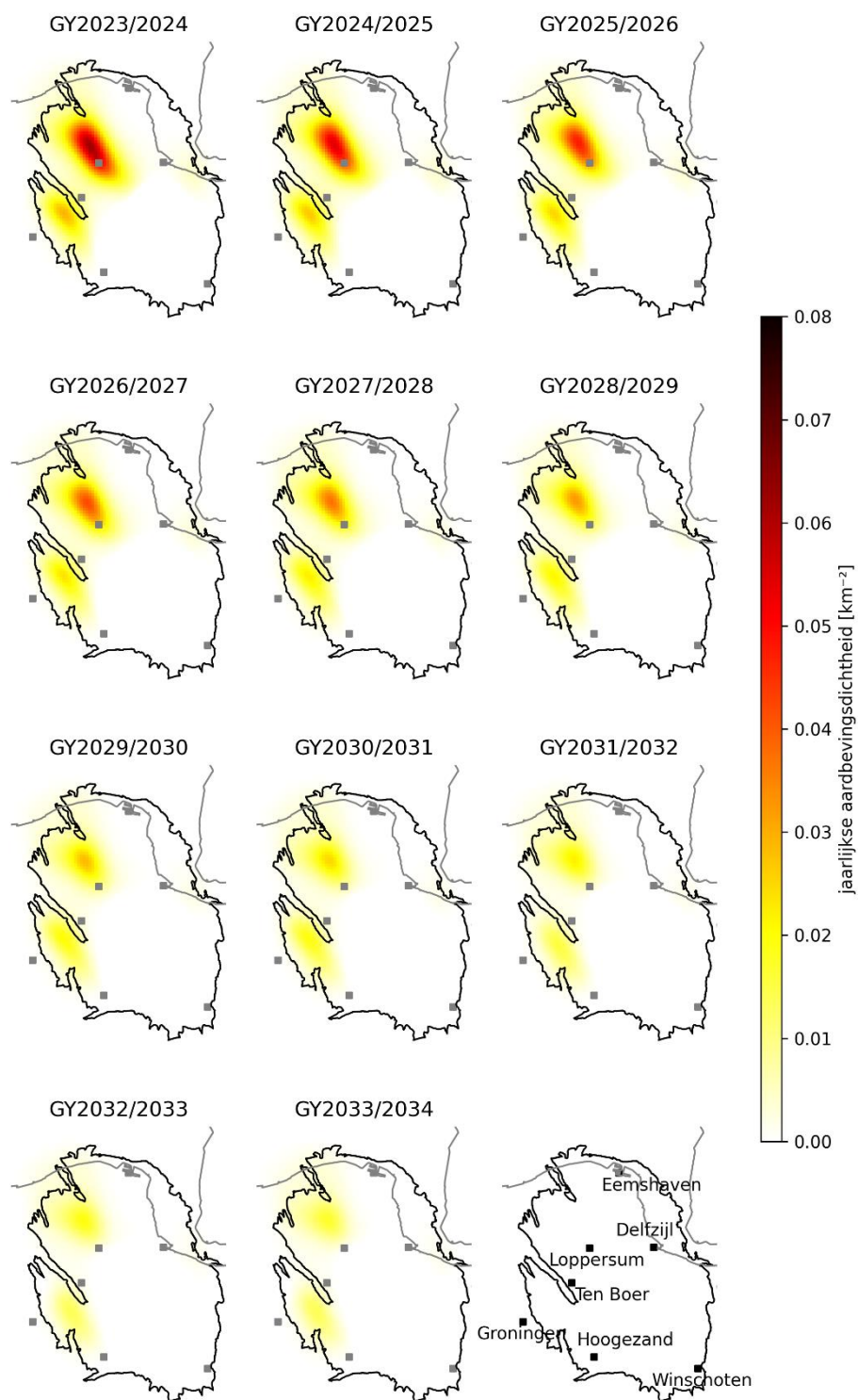
De overschrijdingskans op zwaardere bevingen is per gasjaar weergegeven in [Tabel 3.1](#). De tabel geeft een overzicht van de tien komende gasjaren, beginnend met gasjaar 2023/2024. Voor het Groningengebied beschouwen we bevingen met een magnitude gelijk of hoger dan 3,5 als zwaardere bevingen. Ter 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 2023/2024 de kans op een beving met een magnitude van 4,0 of hoger 1,49% bedraagt.

Tabel 3.1: Jaarlijkse verwachting van het aantal bevingen met magnitude gelijk aan of hoger dan M1.5 en overschrijdingskansen voor een aantal geselecteerde magnitudes per gasjaar voor scenario 1. De eerste kolom geeft het gasjaar (*gas year – GY*) weer.

	Verwachting	M3.5	M3.6	M4.0	M4.5	M5.0
GY2023/2024	5.20	6.22%	4.86%	1.49%	0.23%	0.03%
GY2024/2025	4.53	5.42%	4.24%	1.29%	0.20%	0.03%
GY2025/2026	3.99	4.76%	3.72%	1.13%	0.18%	0.02%
GY2026/2027	3.53	4.21%	3.28%	1.00%	0.16%	0.02%
GY2027/2028	3.16	3.76%	2.93%	0.89%	0.14%	0.02%
GY2028/2029	2.84	3.37%	2.62%	0.79%	0.12%	0.02%
GY2029/2030	2.57	3.04%	2.37%	0.71%	0.11%	0.02%
GY2030/2031	2.34	2.77%	2.15%	0.65%	0.10%	0.01%
GY2031/2032	2.01	2.36%	1.84%	0.55%	0.09%	0.01%
GY2032/2033	1.73	2.04%	1.59%	0.48%	0.07%	0.01%
GY2033/2034	1.61	1.90%	1.47%	0.44%	0.07%	0.01%

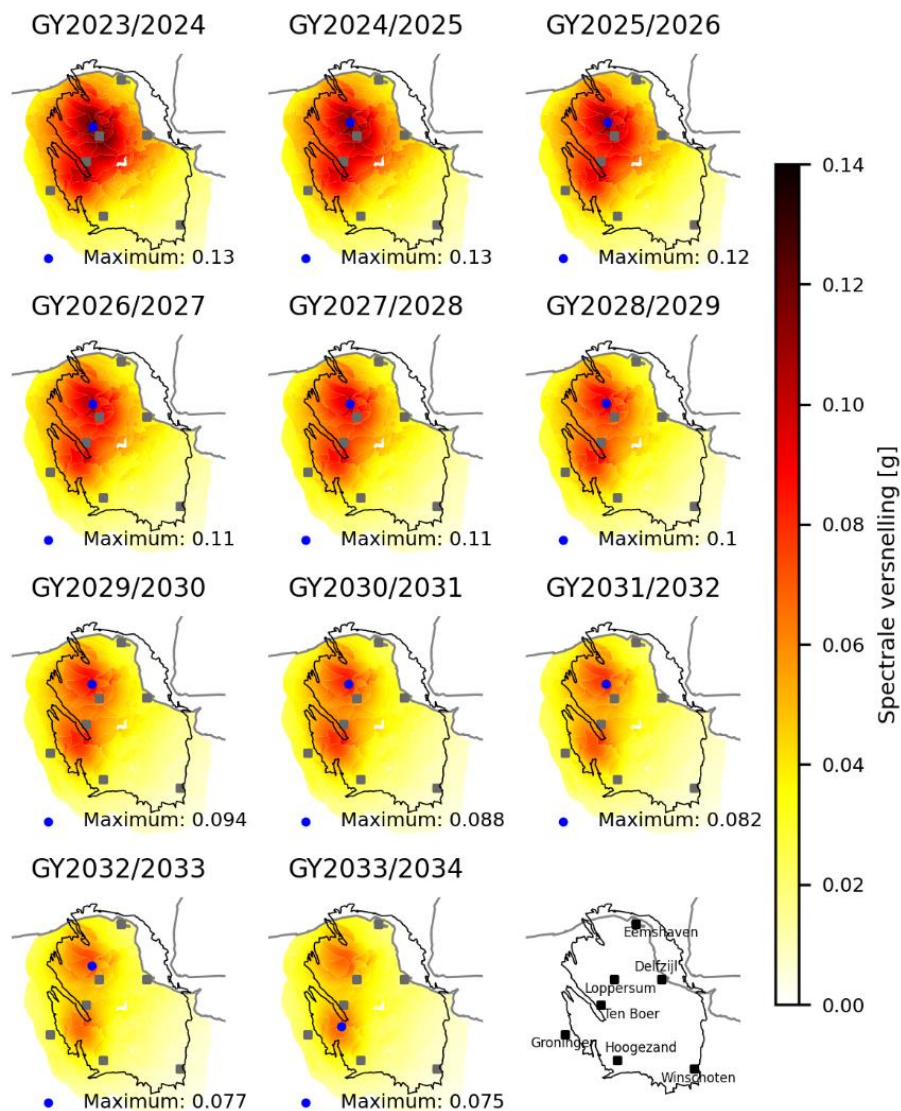
De verwachte jaarlijkse aardbevingsdichtheid voor gasjaren 2023/2024 tot en met 2033/2034 is weergegeven in [Figuur 3.2](#). De jaarlijkse aardbevingsdichtheid is het verwachte aantal bevingen met een magnitude gelijk aan of hoger dan 1,5 per vierkante kilometer per gasjaar. De kleurenschaal voor alle 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.



Figuur 3.2: Jaarlijkse aardbevingsdichtheidskaarten voor gasjaar 2023/2024 tot en met gasjaar 2033/2034 voor scenario 1.

3.2 Seismische dreiging scenario 1

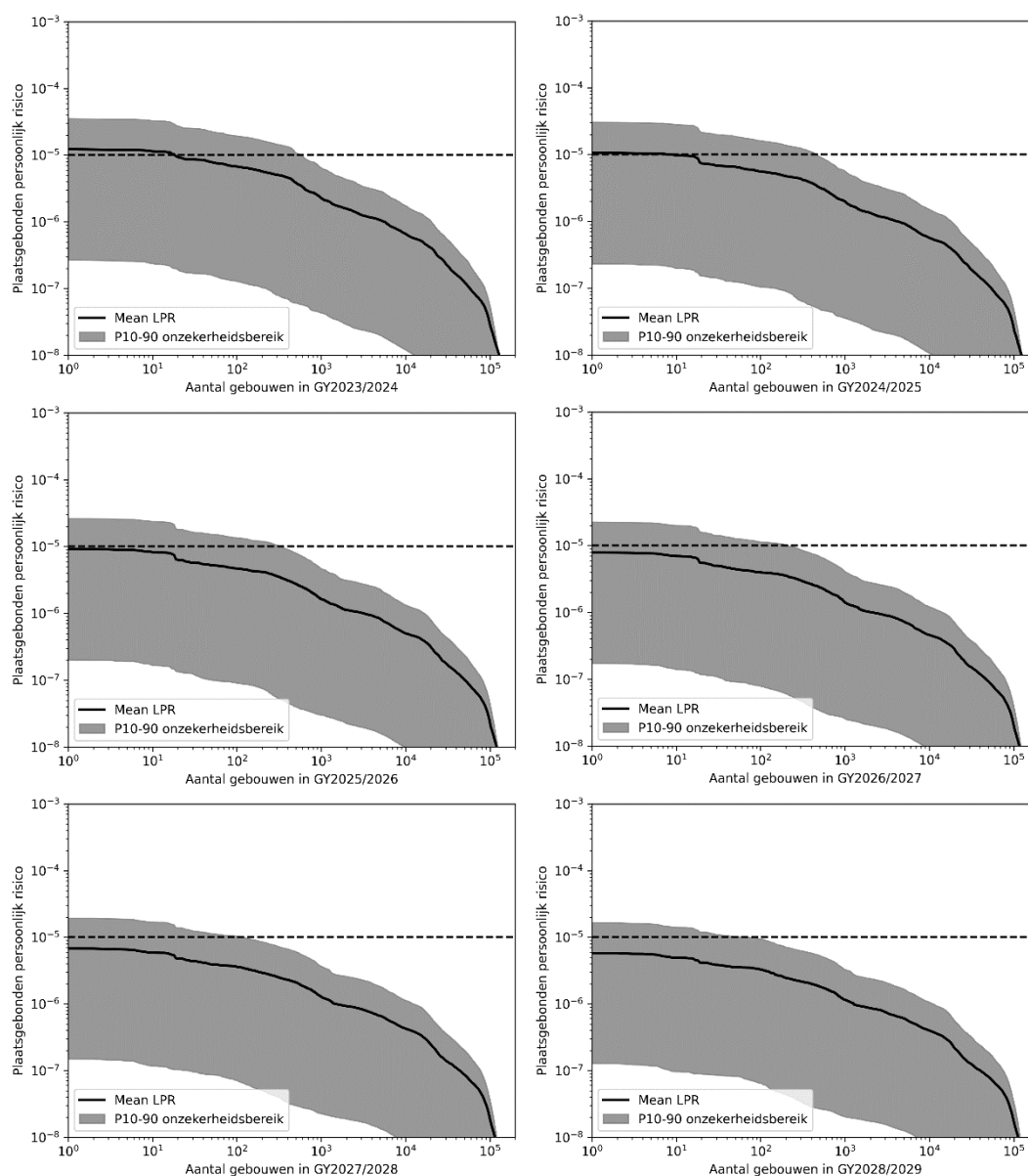
Dreigingskaarten geven de intensiteit van seismische grondbewegingen weer voor een gegeven herhalingstijd. De verwachte seismische dreiging bij een herhalingstijd van 475 jaar voor gasjaar 2023/2024 tot en met gasjaar 2053/2054 is weergegeven in [Figuur 3.3](#). De spectrale versnelling bij de trillingsperiode van 0.01 s komt in de praktijk overeen met de piekgrondversnelling (*PGA*). 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.

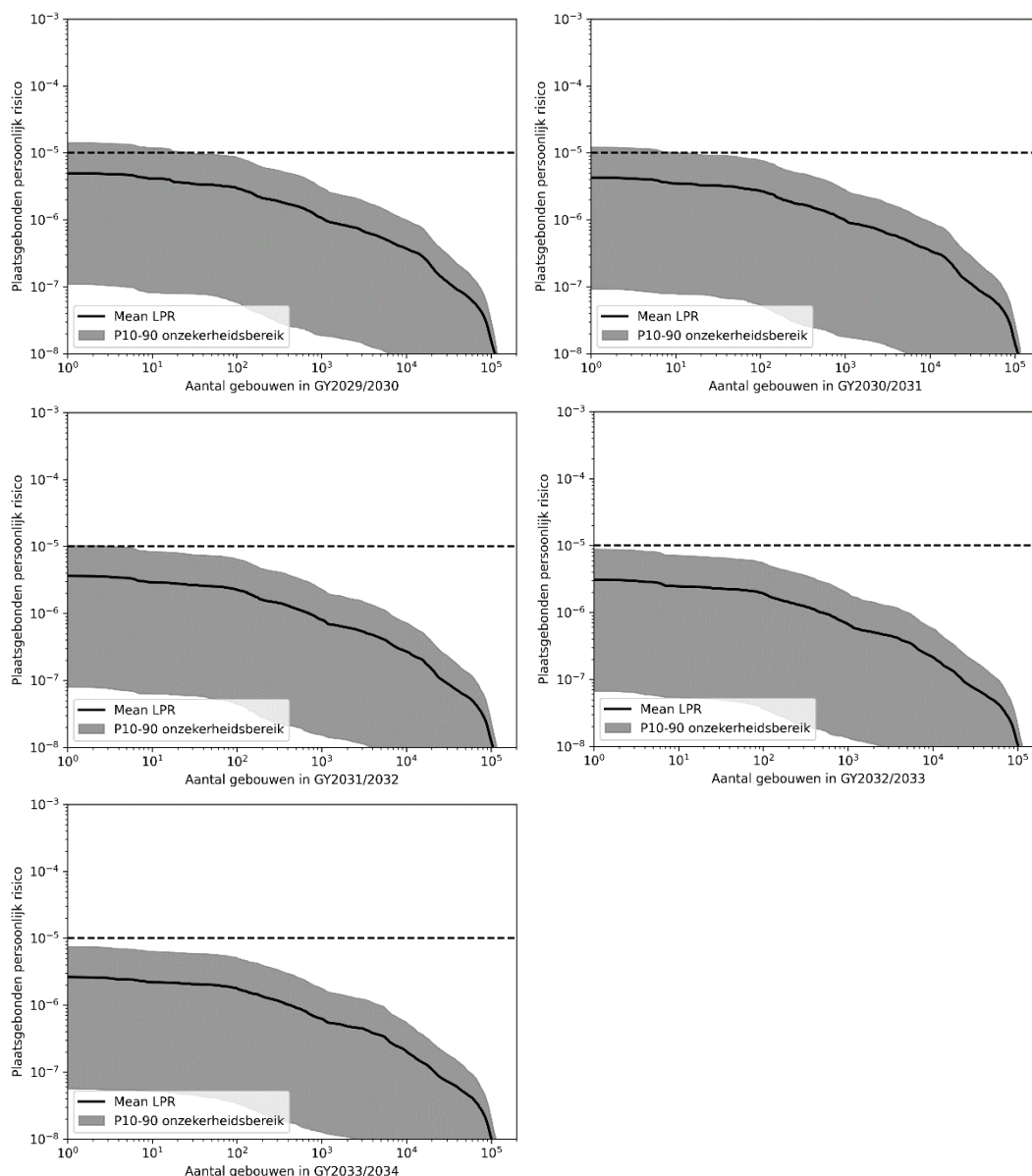


Figuur 3.3: Overzicht van de jaarlijkse seismische dreigingskaarten voor gasjaar 2023/2024 tot en met gasjaar 2033/2034 voor scenario 1.

3.3 Seismisch risico scenario 1

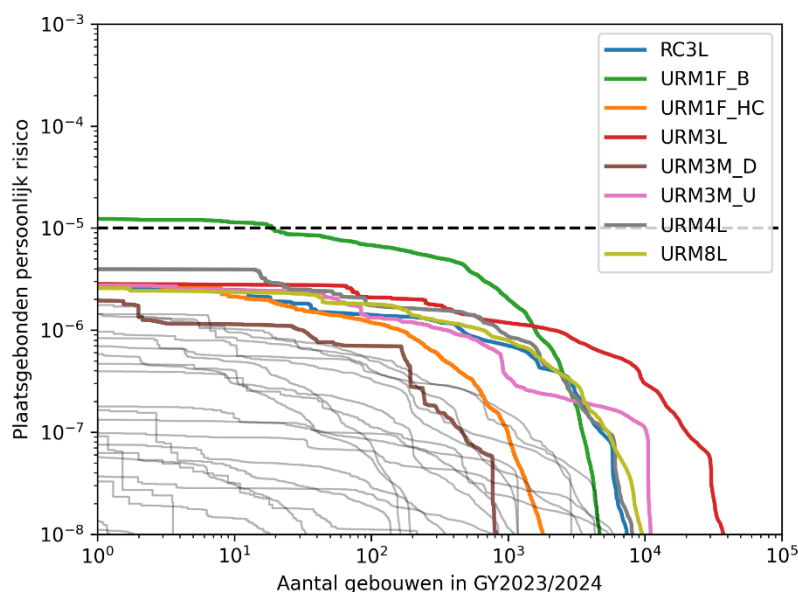
Figuur 3.4 toont het aantal gebouwen dat een jaarlijkse verwachtingswaarde van het LPR overschrijdt voor het gasjaar 2023/2024 tot en met gasjaar 2033/2034. De grijze band in de LPR-grafieken geeft het onzekerheidsbereik aan. Vanaf gasjaar 2025/2026 voldoen alle gebouwen aan de veiligheidsnorm.





Figuur 3.4: LPR-grafieken voor de gasjaren 2023/2024 tot en met 2033/2034. Op de horizontale as staat het aantal gebouwen; op de verticale as het LPR. De horizontale stippellijn is het LPR-niveau van de Meijdamnorm (10^{-5}). 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 van het LPR aan. De grijze band geeft de spreiding in de beslissboom voor modelonzekerheden weer voor een betrouwbaarheidsinterval tussen de percentielen P10 en P90.

Naast de verwachtingswaarde van de LPR voor de hele gebouwenvoorraad wordt ook de verwachtingswaarde van de LPR voor alle gebouwen per bouwtype (typologie) bepaald. **Figuur 3.5** en **Tabel 3.2** tonen dat 18 gebouwen in het aardbevingsgebied volgens de voorgeschreven modellen niet aan de Meijdamnorm voldoen in gasjaar 2023/2024. Het schuurgedeelte van een boerderij (type URM1F_B) is het meest kwetsbaar (groene curve in **Figuur 3.5**). De verwachtingswaarde van het risico voor alle gebouwen van de overige typologieën is aanzienlijk lager dan 10^{-5} per jaar. Voor alle bouwtypologieën neemt het verwachte seismisch risico jaarlijks af.



Figuur 3.5: LPR-grafiek voor gasjaar 2023/2024. De interpretatie van de curves is vergelijkbaar met die in Figuur 3.4; echter nu met een aparte curve voor de verwachtingswaarde per bouwtype (typologie). De gekleurde curves zijn apart benoemd in de legenda.

Tabel 3.2: Het aantal gebouwen per gasjaar waarvoor de verwachtingswaarde van het LPR niet aan de Meijdamnorm (10^{-5}) voldoet voor scenario 1.

	Verwachtingswaarde LPR 1e-5
GY2023/2024	18
GY2024/2025	8
GY2025/2026	0
GY2026/2027	0
GY2027/2028	0
GY2028/2029	0
GY2029/2030	0
GY2030/2031	0
GY2031/2032	0
GY2032/2033	0
GY2033/2034	0

3.4 Schade prognose scenario 1

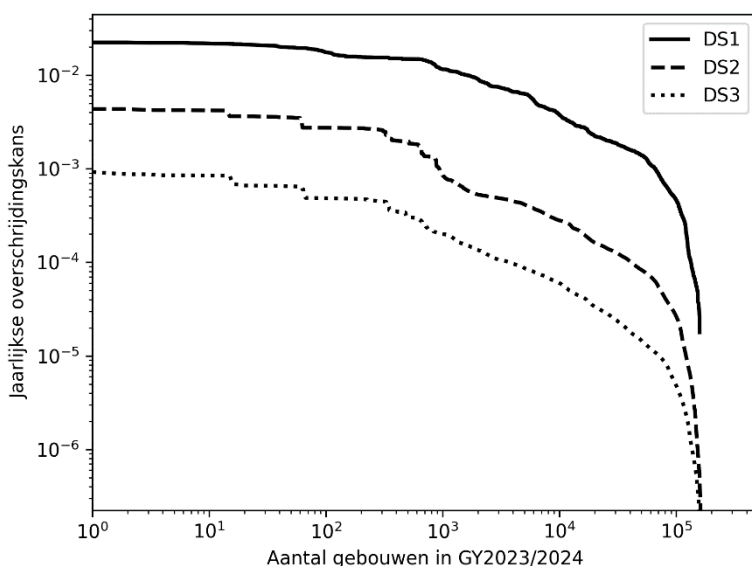
Het document EMS-98 (*European Seismological Commission, 1998*) geeft richtlijnen voor het schatten van de intensiteit van een aardbeving op basis van de schadebeoordeling van gebouwen, zoals ook gebruikt door NAM (2020). Schade aan gebouwen wordt beoordeeld op basis van een schade classificatie. Dit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

De Gebouwendatabase (*Exposure Database* - EDB 2023) 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 levert de Gebouwendatabase ook de nodige informatie om de typologieën toe te kennen aan zo'n 157 duizend gebouwen in het schadeprognose 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 2023 is een buffer van 5 km rond de omtrek van het gasveld.

Voor de berekening van de kans op overschrijding van de laagste schadetoestand DS1 worden empirische modellen voor groundbeweging en kwetsbaarheid gebruikt, dat wil zeggen, modellen die gebaseerd zijn op de lokaal geobserveerde groundbewegingen en schades. Aangezien voor de hogere schadetoestanden DS2 en DS3 de empirische gegevens ontoereikend zijn, wordt daarvoor gebruik gemaakt van zowel het groundbewegingsmodel als het kwetsbaarheidsmodel die ten grondslag liggen aan de risicoanalyse. 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 3.6 toont de resultaten van de schadeprognose 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 2023/2024. **Tabel 3.3** 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 2023 voor scenario 1.



Figuur 3.6: Jaarlijkse overschrijdingskans voor schadetoestanden DS1 t/m DS3 voor gasjaar 2023/2024 voor alle gebouwen in de exposure database voor scenario 1.

Tabel 3.3: Prognose van het aantal gebouwen dat schadetoestand DS1, DS2 en DS3 overschrijdt per gasjaar voor scenario 1.

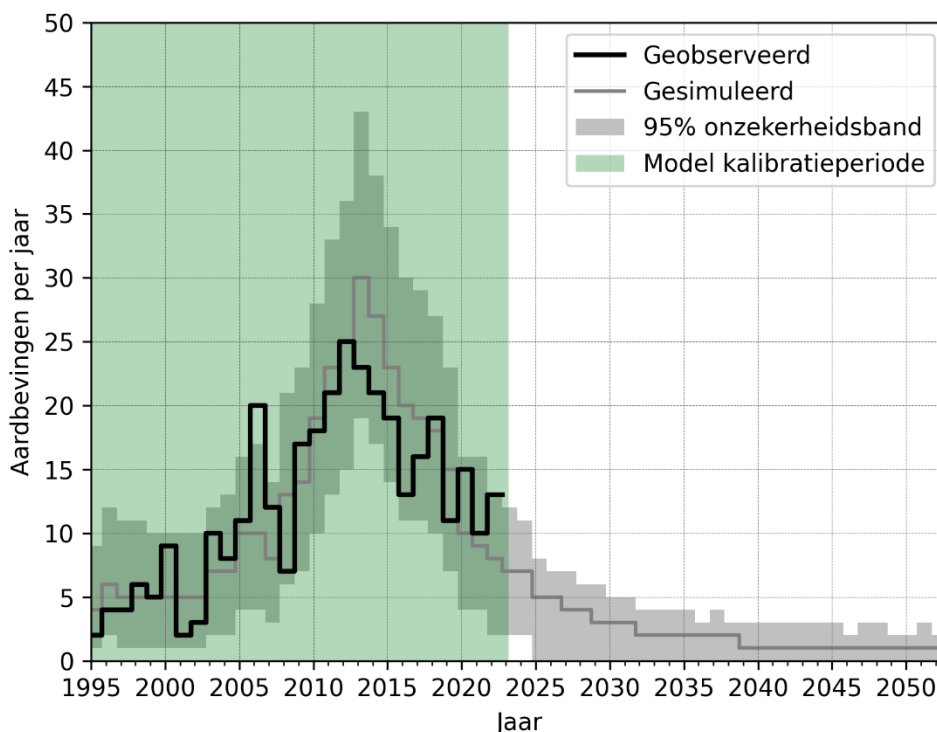
Verwachtingswaarden overschrijdingen			
	DS1	DS2	DS3
GY2023/2024	204	14	3
GY2024/2025	178	13	2
GY2025/2026	157	11	2
GY2026/2027	139	10	2
GY2027/2028	126	9	2
GY2028/2029	114	8	2
GY2029/2030	104	7	1
GY2030/2031	96	7	1
GY2031/2032	79	6	1
GY2032/2033	66	5	1
GY2033/2034	62	4	1

4 Analyse scenario 2a

Het uitgangspunt voor scenario 2a is een waakvlam productie (*minimum flow*) van alle elf operationele productieclusters en sluiting van het Groningenveld per 1 oktober 2024.

4.1 Seismiciteit scenario 2a

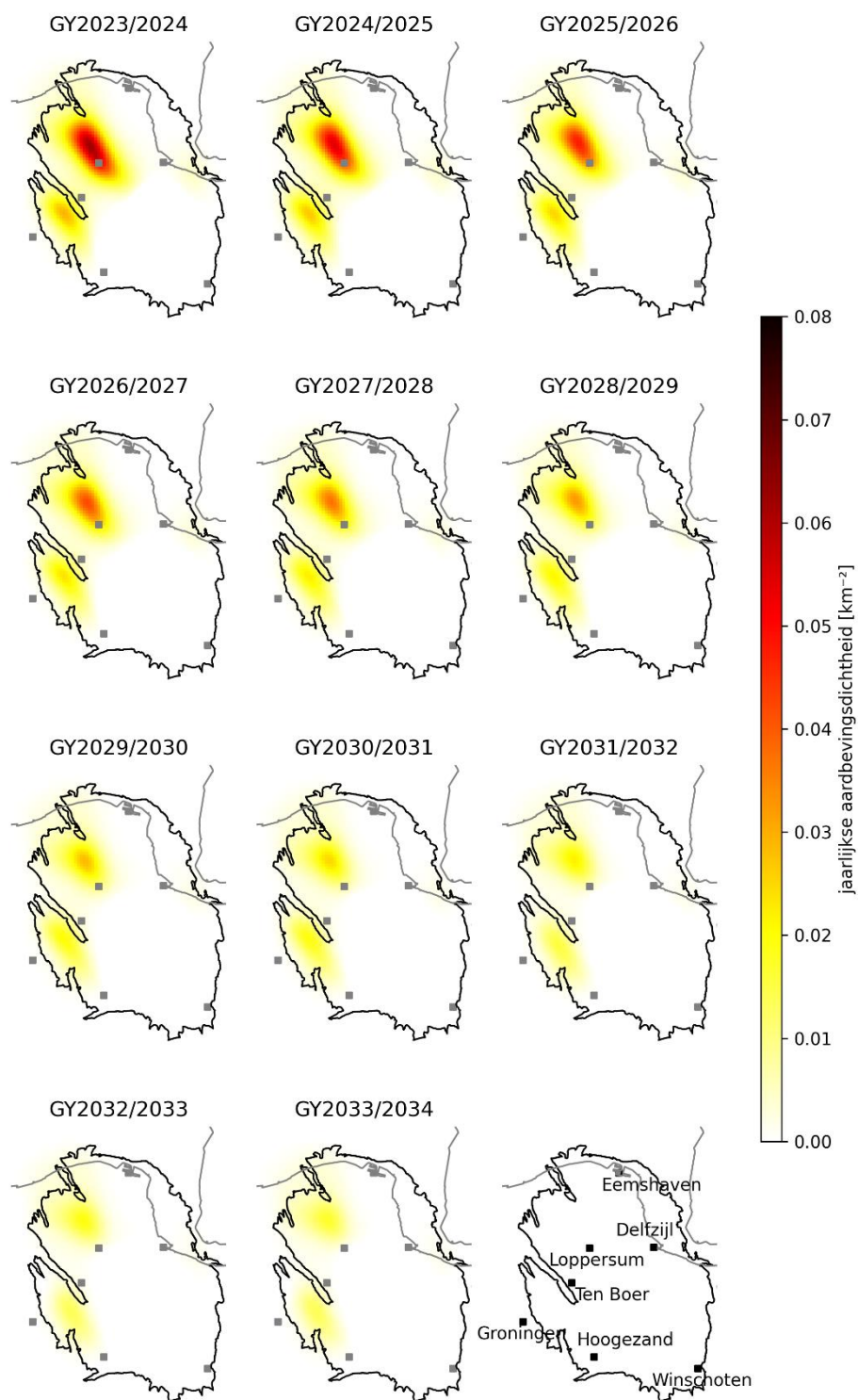
De seismiciteit volgens scenario 2a is weergegeven in [Figuur 4.1](#), [Figuur 4.2](#) en [Tabel 4.1](#).



Figuur 4.1: Verwachte seismische activiteit en variatie per gasjaar voor scenario 2a. Op de horizontale as staat het kalenderjaar (bereik 1 januari 1995 tot 1 oktober 2052). 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 per gasjaar in het verleden weer tot 1 oktober 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 28 februari 2023.

Tabel 4.1: Jaarlijkse verwachting van het aantal bevingen met magnitude gelijk aan of hoger dan M1.5 en overschrijdingskansen voor een aantal geselecteerde magnitudes per gasjaar voor scenario 2a. De eerste kolom geeft het gasjaar (*gas year – GY*) weer.

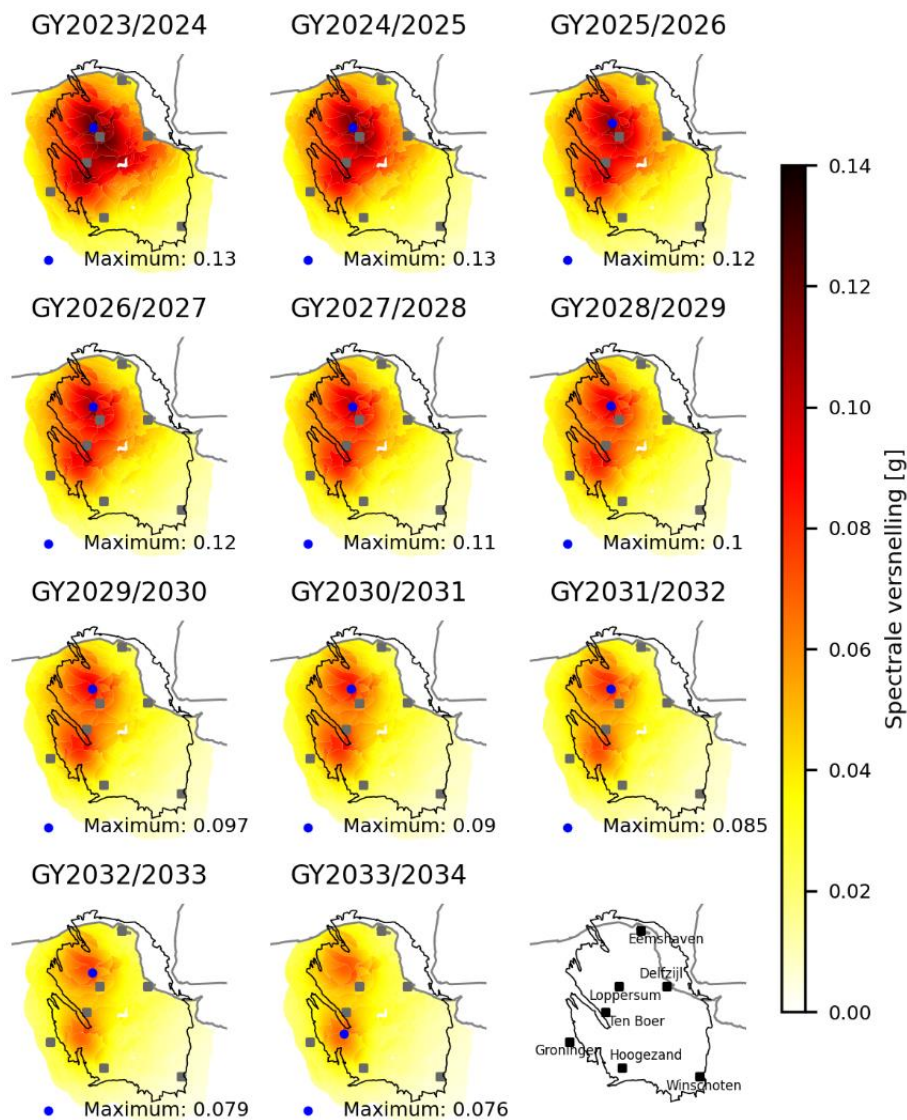
	Verwachting	M3.5	M3.6	M4.0	M4.5	M5.0
GY2023/2024	5.91	7.07%	5.54%	1.70%	0.27%	0.04%
GY2024/2025	4.78	5.73%	4.48%	1.37%	0.21%	0.03%
GY2025/2026	4.21	5.04%	3.94%	1.20%	0.19%	0.03%
GY2026/2027	3.72	4.44%	3.47%	1.05%	0.16%	0.02%
GY2027/2028	3.32	3.96%	3.09%	0.94%	0.15%	0.02%
GY2028/2029	2.97	3.53%	2.75%	0.83%	0.13%	0.02%
GY2029/2030	2.68	3.17%	2.47%	0.75%	0.12%	0.02%
GY2030/2031	2.43	2.88%	2.24%	0.68%	0.10%	0.01%
GY2031/2032	2.08	2.46%	1.91%	0.58%	0.09%	0.01%
GY2032/2033	1.80	2.12%	1.65%	0.50%	0.08%	0.01%
GY2033/2034	1.67	1.96%	1.53%	0.46%	0.07%	0.01%



Figuur 4.2: Jaarlijkse aardbevingsdichtheidskaarten voor scenario 2a voor gasjaar 2023/2024 tot en met gasjaar 2033/2034.

4.2 Seismische dreiging scenario 2a

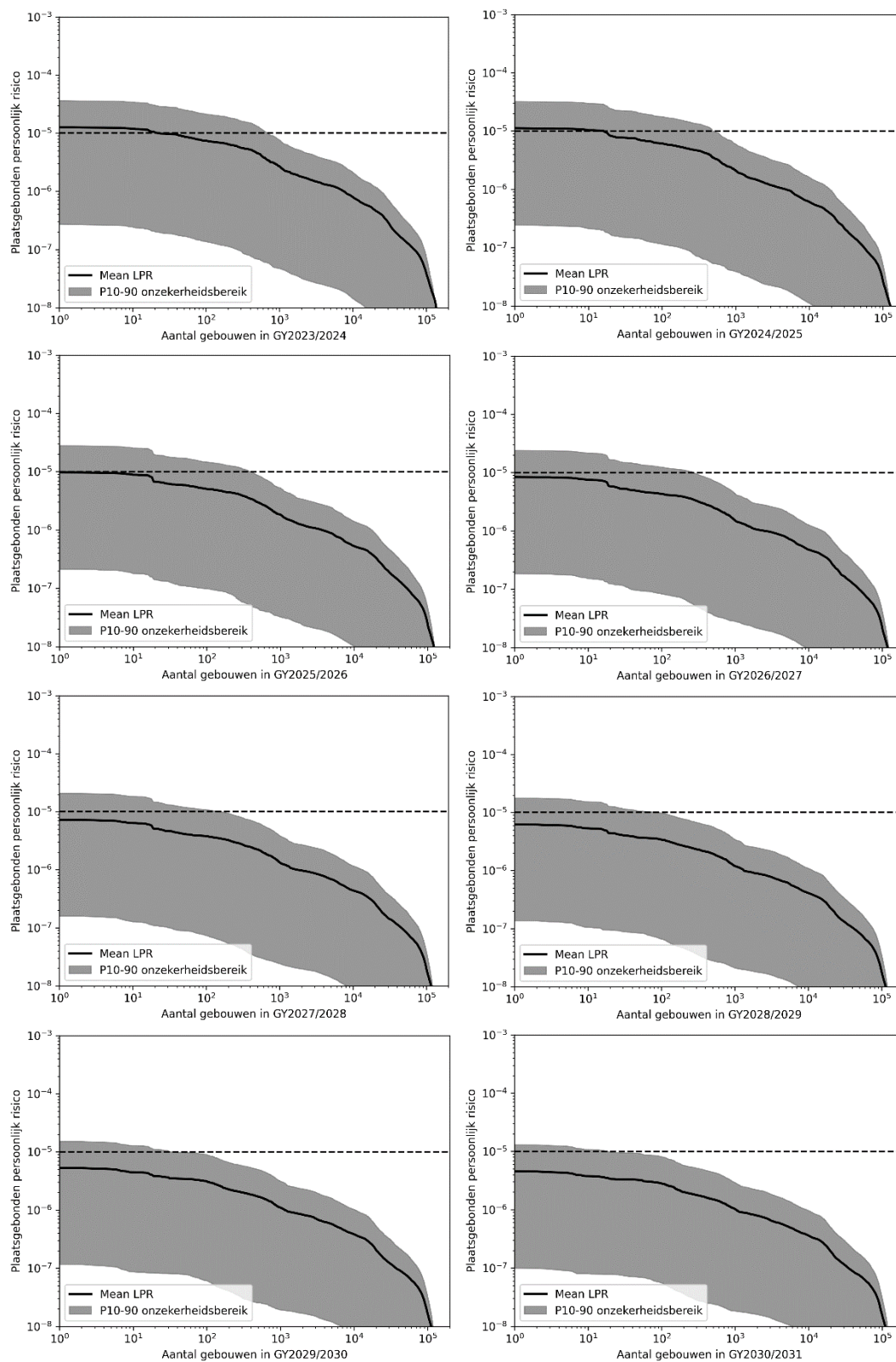
De seismische dreiging voor scenario 2a is weergegeven in [Figuur 4.3](#).

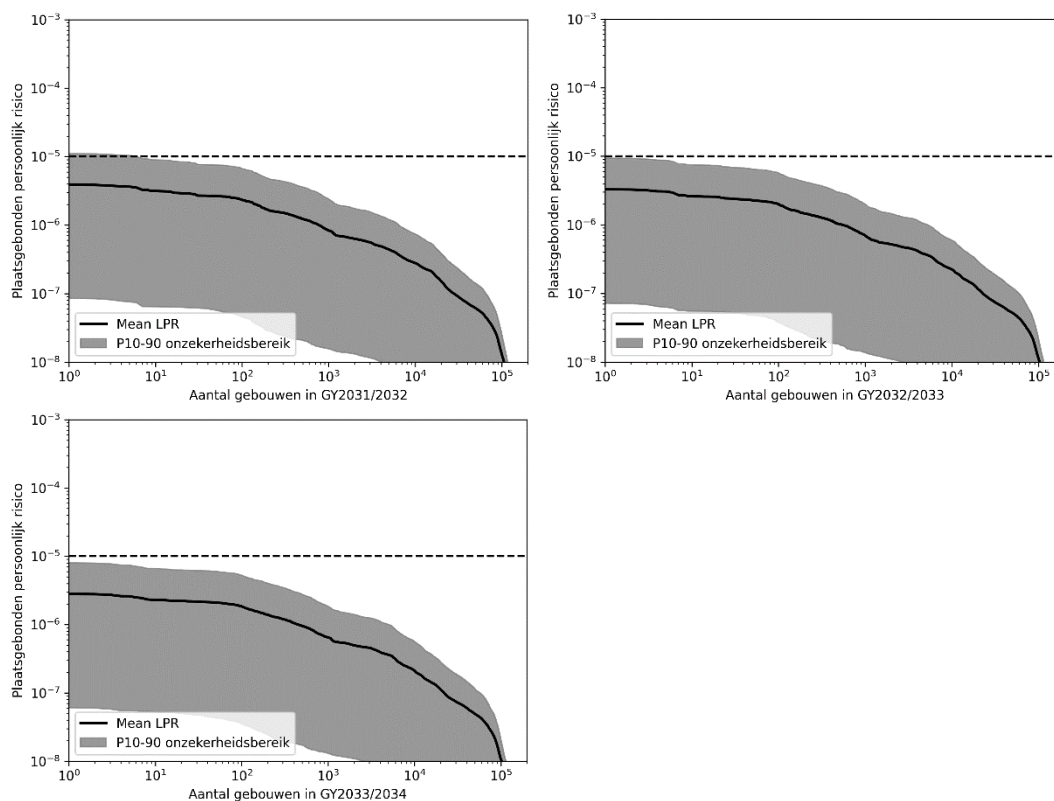


Figuur 4.3: Overzicht van de jaarlijkse seismische dreigingskaarten voor gasjaar 2023/2024 tot en met gasjaar 2033/2034 voor scenario 2a.

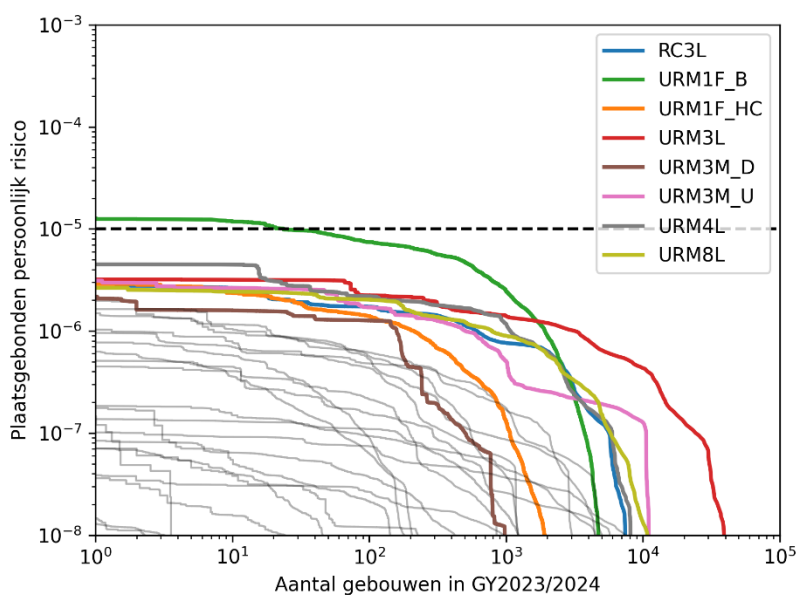
4.3 Seismisch risico scenario 2a

Het seismisch risico volgens het aantal gebouwen dat een jaarlijkse verwachting van het LPR overschrijdt is weergegeven in [Figuur 4.4](#), [Figuur 4.5](#) en [Tabel 4.2](#) voor scenario 2a.





Figuur 4.4: LPR-grafieken voor de gasjaren 2023/2024 tot en met 2033/2034 gasjaar voor scenario 2a. Op de horizontale as staat het aantal gebouwen; op de verticale as het LPR. De horizontale stippellijn is het LPR-niveau van de Meijdamnorm (10^{-5}). 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 van het LPR aan. De grijze band geeft de spreiding in de beslisboom voor modelonzekerheden weer voor een betrouwbaarheidsinterval tussen de percentielen P10 en P90.



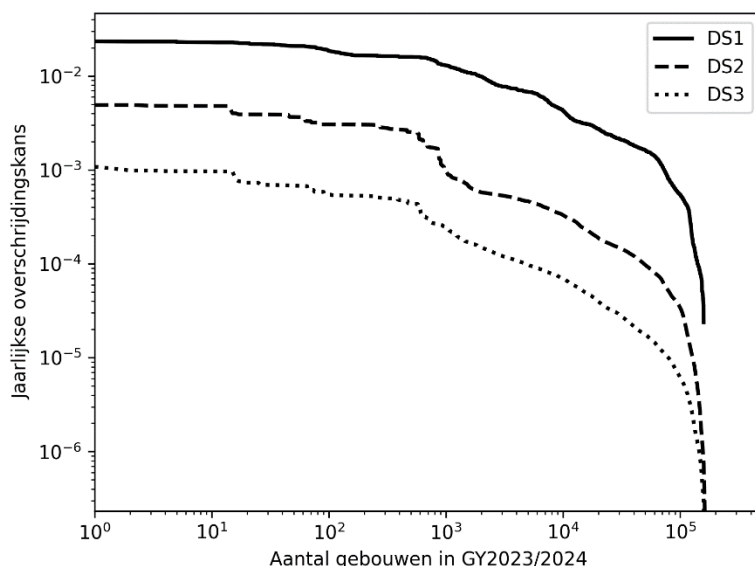
Figuur 4.5: LPR-grafiek voor gasjaar 2023/2024 voor scenario 2a met de verwachtingswaarde per gebouwtype (typologie).

Tabel 4.2: Het aantal gebouwen per gasjaar waarvoor de verwachtingswaarde van het LPR niet aan de Meijdamnorm (10^{-5}) voldoet voor scenario 2a.

	Verwachtingswaarde LPR $1e-5$
GY2023/2024	23
GY2024/2025	16
GY2025/2026	0
GY2026/2027	0
GY2027/2028	0
GY2028/2029	0
GY2029/2030	0
GY2030/2031	0
GY2031/2032	0
GY2032/2033	0
GY2033/2034	0

4.4 Schade prognose scenario 2a

Figuur 4.6 toont de resultaten van de schadeprognose 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 2023/2024. **Tabel 4.3** 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 2023 voor scenario 2a.



Figuur 4.6: Jaarlijkse overschrijdingskans voor schadetoestanden DS1 t/m DS3 voor gasjaar 2023/2024 voor alle gebouwen in de exposure database voor scenario 2a.

Tabel 4.3: Prognose van het aantal gebouwen dat schadetoestand DS1, DS2 en DS3 overschrijdt per gasjaar voor scenario 2a.

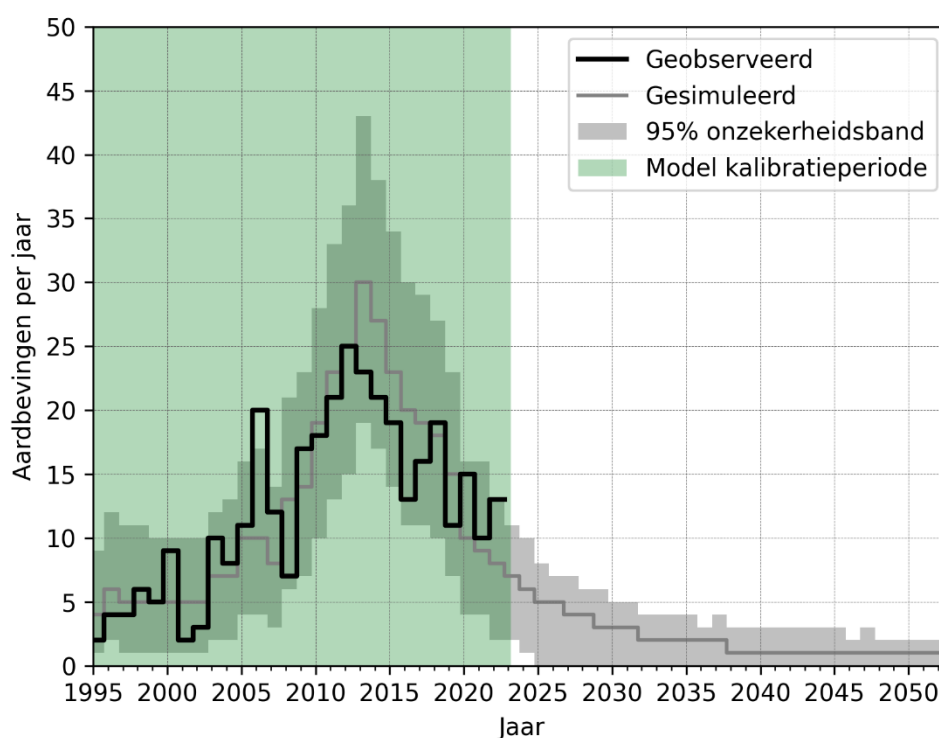
Verwachtingswaarden overschrijdingen			
	DS1	DS2	DS3
GY2023/2024	234	17	3
GY2024/2025	188	13	3
GY2025/2026	166	12	2
GY2026/2027	147	10	2
GY2027/2028	132	9	2
GY2028/2029	119	8	2
GY2029/2030	108	8	2
GY2030/2031	99	7	1
GY2031/2032	82	6	1
GY2032/2033	68	5	1
GY2033/2034	64	5	1

5 Analyse scenario 2b

Het uitgangspunt voor scenario 2b is een waakvlam productie (*minimum flow*) van vijf operationele productieclusters en sluiting van het Groningenveld per 1 oktober 2024.

5.1 Seismiciteit scenario 2b

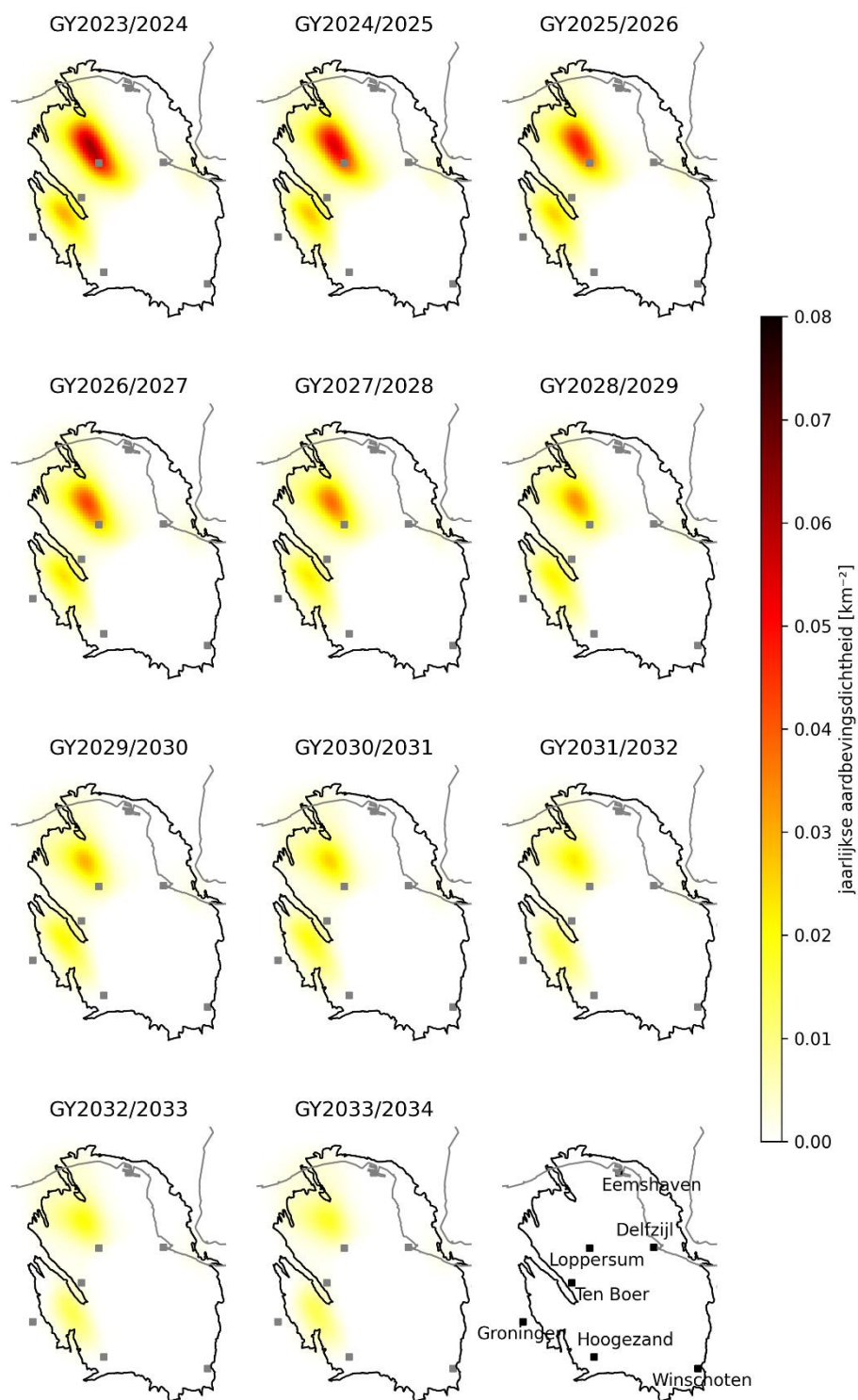
De seismiciteit volgens scenario 2b is weergegeven in [Figuur 5.1](#), [Figuur 5.2](#) en [Tabel 5.1](#).



Figuur 5.1: Verwachte seismische activiteit en variatie per gasjaar voor scenario 2b. Op de horizontale as staat het kalenderjaar (bereik 1 januari 1995 tot 1 oktober 2052). 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 per gasjaar in het verleden weer tot 1 oktober 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 28 februari 2023.

Tabel 5.1: Jaarlijkse verwachting van het aantal bevingen met magnitude gelijk aan of hoger dan M1.5 en overschrijdingskansen voor een aantal geselecteerde magnitudes per gasjaar voor scenario 2b. De eerste kolom geeft het gasjaar (*gas year – GY*) weer.

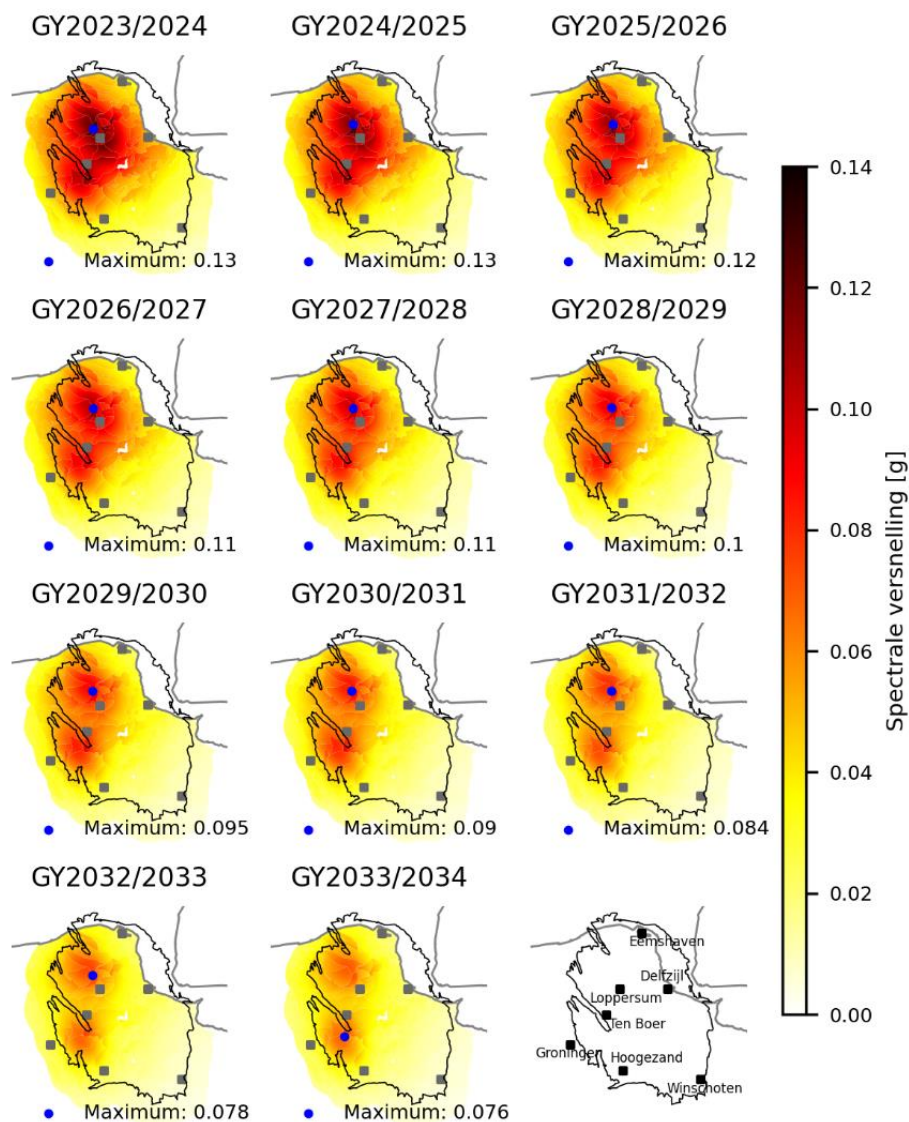
	Verwachting	M3.5	M3.6	M4.0	M4.5	M5.0
GY2023/2024	5.32	6.36%	4.97%	1.52%	0.24%	0.03%
GY2024/2025	4.65	5.56%	4.35%	1.33%	0.21%	0.03%
GY2025/2026	4.11	4.91%	3.83%	1.17%	0.18%	0.03%
GY2026/2027	3.64	4.34%	3.39%	1.03%	0.16%	0.02%
GY2027/2028	3.25	3.87%	3.02%	0.92%	0.14%	0.02%
GY2028/2029	2.92	3.46%	2.70%	0.82%	0.13%	0.02%
GY2029/2030	2.63	3.12%	2.43%	0.73%	0.11%	0.02%
GY2030/2031	2.40	2.83%	2.21%	0.67%	0.10%	0.01%
GY2031/2032	2.05	2.42%	1.89%	0.57%	0.09%	0.01%
GY2032/2033	1.77	2.09%	1.63%	0.49%	0.08%	0.01%
GY2033/2034	1.65	1.94%	1.51%	0.45%	0.07%	0.01%



Figuur 5.2: Jaarlijkse aardbevingsdichtheidskaarten voor scenario 2b voor gasjaar 2023/2024 tot en met gasjaar 2033/2034.

5.2 Seismische dreiging scenario 2b

De seismische dreiging voor scenario 2b is weergegeven in [Figuur 5.3](#).

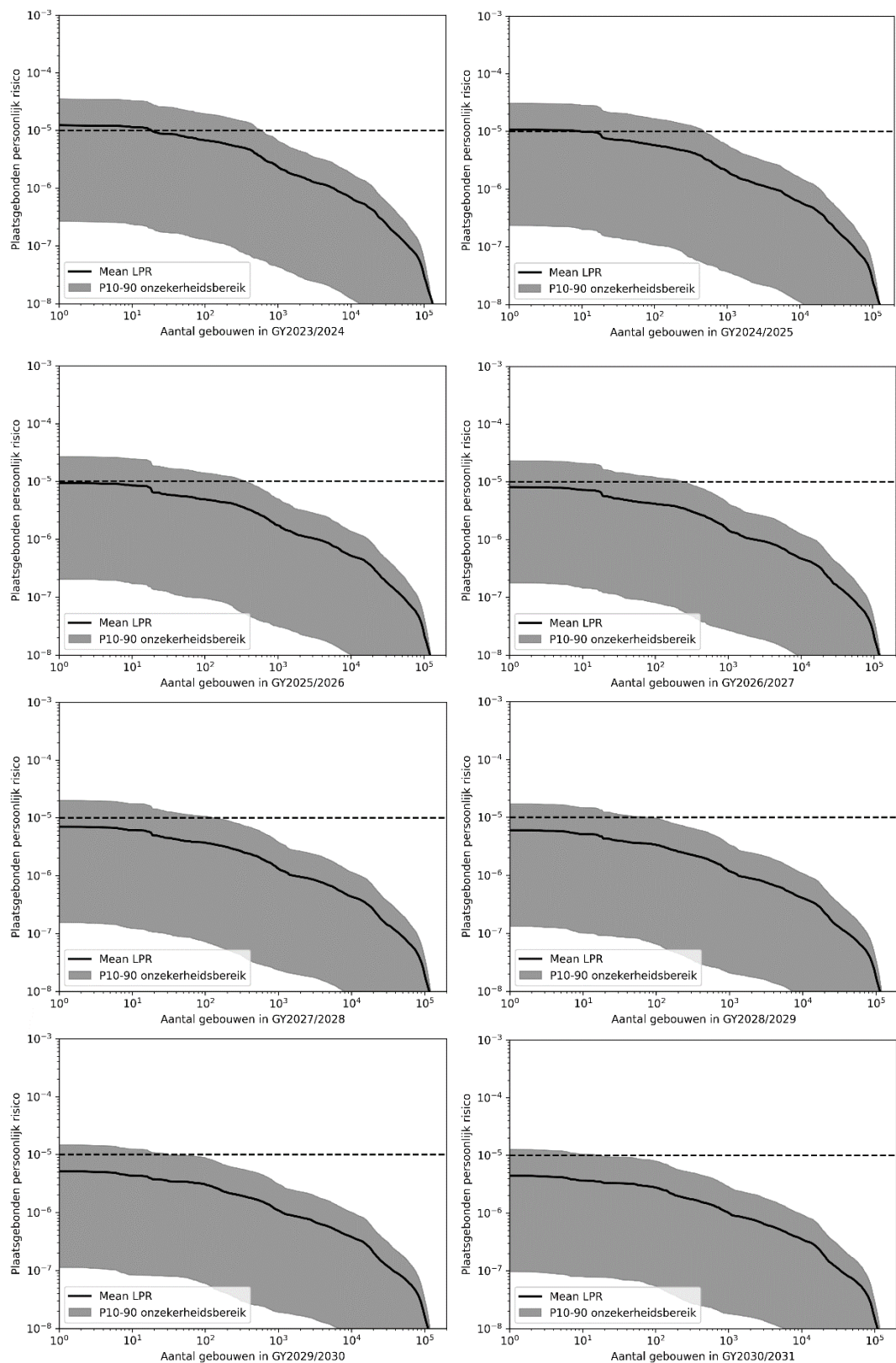


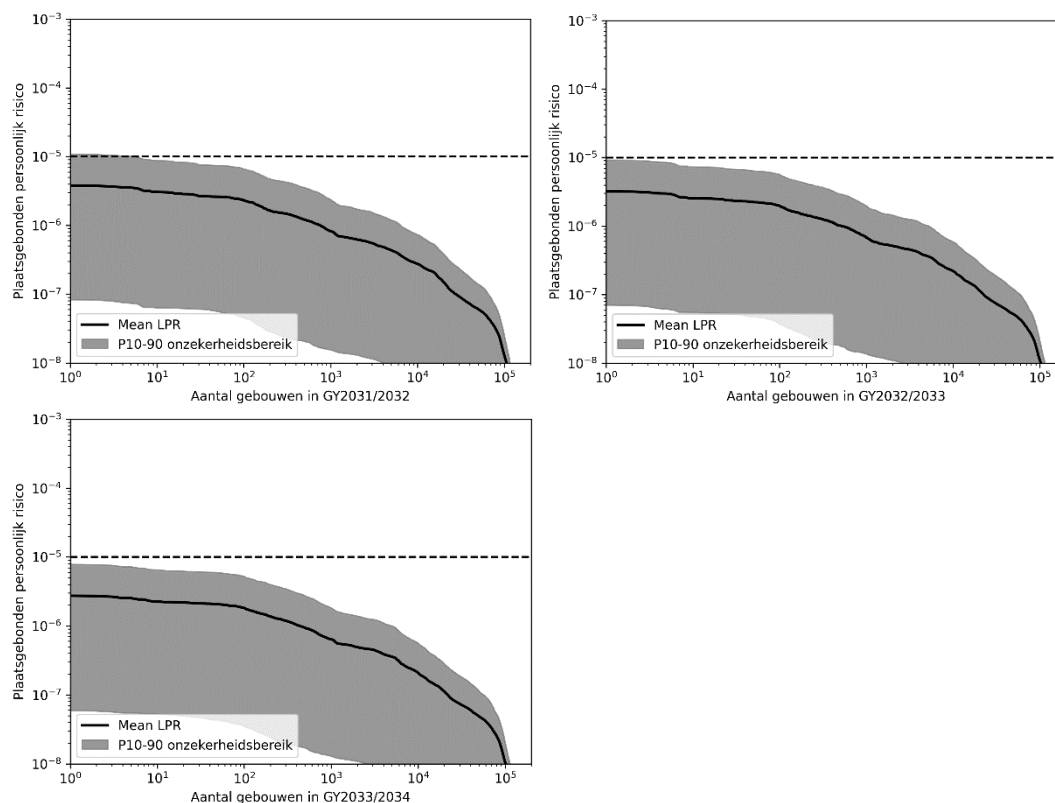
Figuur 5.3: Overzicht van de jaarlijkse seismische dreigingskaarten voor gasjaar 2023/2024 tot en met gasjaar 2033/2034 voor scenario 2a.

5.3 Seismisch risico scenario 2b

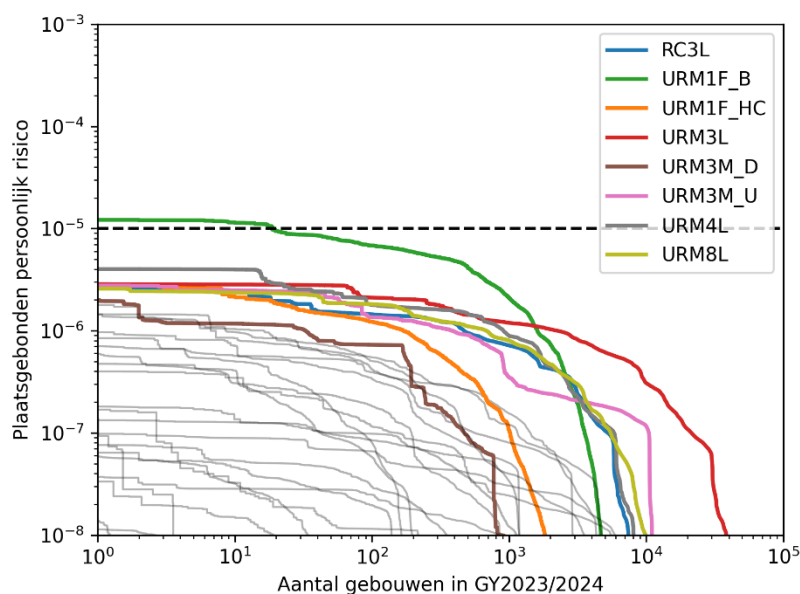
Het seismisch risico volgens het aantal gebouwen dat een jaarlijkse verwachting van het LPR overschrijdt is weergegeven in [Figuur 5.4](#), [Figuur 5.5](#) en LPR-grafiek voor gasjaar 2023/2024 voor scenario 2a met de verwachtingswaarde per gebouwtype (typologie).

[Tabel 5.2](#) voor scenario 2b.





Figuur 5.4: LPR-grafieken voor de gasjaren 2023/2024 tot en met 2023/2034 gasjaar voor scenario 2b. Op de horizontale as staat het aantal gebouwen; op de verticale as het LPR. De horizontale stippellijn is het LPR-niveau van de Meijdamnorm (10^{-5}). 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 van het LPR aan. De grijze band geeft de spreiding in de beslisboom voor modelonzekerheden weer voor een betrouwbaarheidsinterval tussen de percentielen P10 en P90.



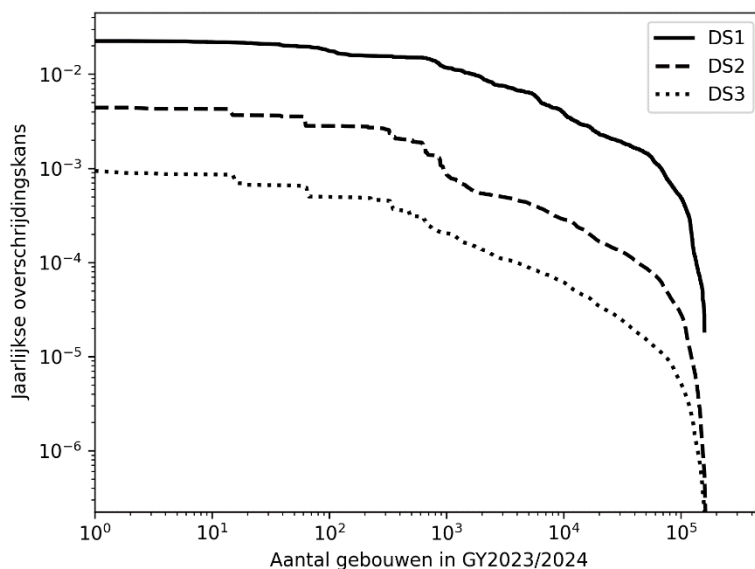
Figuur 5.5: LPR-grafiek voor gasjaar 2023/2024 voor scenario 2a met de verwachtingswaarde per gebouwtype (typologie).

Tabel 5.2: Het aantal gebouwen per gasjaar waarvoor de verwachtingswaarde van het LPR niet aan de Meijdamnorm (10^{-5}) voldoet voor scenario 2b.

	Verwachtingswaarde LPR $1e-5$
GY2023/2024	18
GY2024/2025	9
GY2025/2026	0
GY2026/2027	0
GY2027/2028	0
GY2028/2029	0
GY2029/2030	0
GY2030/2031	0
GY2031/2032	0
GY2032/2033	0
GY2033/2034	0

5.4 Schade prognose scenario 2b

Figuur 5.6 toont de resultaten van de schadeprognose voor schadetoestanden DS1 t/m DS3 voor scenario 2b. **Tabel 5.3** geeft de verwachtingswaarde van het aantal gebouwen dat schadetoestand DS1 t/m DS3 jaarlijks overschrijdt voor scenario 2b.



Figuur 5.6: Jaarlijkse overschrijdingskans voor schadetoestanden DS1 t/m DS3 voor gasjaar 2023/2024 voor alle gebouwen in de exposure database voor scenario 2b.

Tabel 5.3: Prognose van het aantal gebouwen dat schadetoestand DS1, DS2 en DS3 overschrijdt per gasjaar voor scenario 2b.

Verwachtingswaarden overschrijdingen			
	DS1	DS2	DS3
GY2023/2024	210	15	3
GY2024/2025	183	13	3
GY2025/2026	162	11	2
GY2026/2027	144	10	2
GY2027/2028	129	9	2
GY2028/2029	116	8	2
GY2029/2030	106	8	1
GY2030/2031	98	7	1
GY2031/2032	81	6	1
GY2032/2033	67	5	1
GY2033/2034	63	5	1

6 Synthese resultaten

In algemene zin kan gezegd worden dat de afname van de historisch waargenomen (afgelopen tien jaar) en verwachte seismische activiteit (komende tien jaar) en aardbevingsdichtheid inzicht geven in de mate waarin verminderde gaswinning in Groningen leidt tot een afname van de seismiciteit en de verandering in de ruimtelijke verdeling hiervan. Daarnaast neemt de overschrijdingskans op zwaardere bevingen (met een magnitude gelijk aan of hoger dan 3,5) komende tien jaar af als gevolg van gaswinning op waakvlamniveau en de verwachte insluiting van het Groningenveld. Ook de verwachte piekgrondversnelling (PGA) neemt de komende tien jaar af.

6.1 Vergelijking scenario 1, 2a & 2b

Deze publieke Seismische Dreigings- en Risicoanalyse voor gasjaar 2023/2024 en verder demonstreert dat de drie onderzochte gasproductiescenario's een marginale invloed hebben op de uitkomsten. De drie productiescenario's laten een vergelijkbaar beeld van de seismische activiteit, dreiging en risico zien.

In Scenario 2a zijn alle nog beschikbare Groningen clusters actief met als gevolg de meeste gasproductie. In dit scenario wordt daarmee ook de hoogste seismische activiteit verwacht: afgerond 6 bevingen in gasjaar 2023/2024 met een magnitude 1,5 of hoger. In dit scenario voldoen 23 huizen niet aan de risiconorm in gasjaar 2023/2024 ([Tabel 6.1](#)).

Scenario 1 (volledige sluiting) en Scenario 2b (5 open clusters) resulteren in vergelijkbare resultaten. Het aantal verwachte bevingen met magnitude 1,5 of hoger is voor gasjaar 2023/2024 afgerond 5. In beide scenario's voldoen 18 huizen niet aan de risiconorm in gasjaar 2023/2024 ([Tabel 6.1](#)).

Tabel 6.1: Het aantal gebouwen per gasjaar waarvoor de verwachtingswaarde van het LPR niet aan de Meijdamnorm (10^{-5}) voldoet voor scenario 1, 2a & 2b.

	Verwachtingswaarde LPR $1e^{-5}$		
	Scenario 1	Scenario 2a	Scenario 2b
GY2023/2024	18	23	18
GY2024/2025	8	16	9
GY2025/2026	0	0	0
GY2026/2027	0	0	0
GY2027/2028	0	0	0
GY2028/2029	0	0	0
GY2029/2030	0	0	0
GY2030/2031	0	0	0
GY2031/2032	0	0	0
GY2032/2033	0	0	0
GY2033/2034	0	0	0

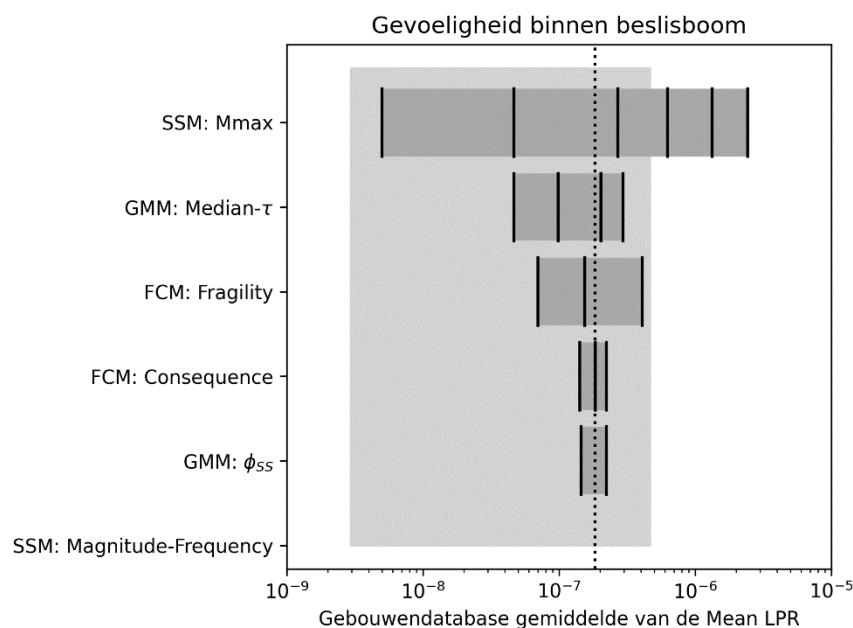
6.2 Vergelijking SDRA 2022

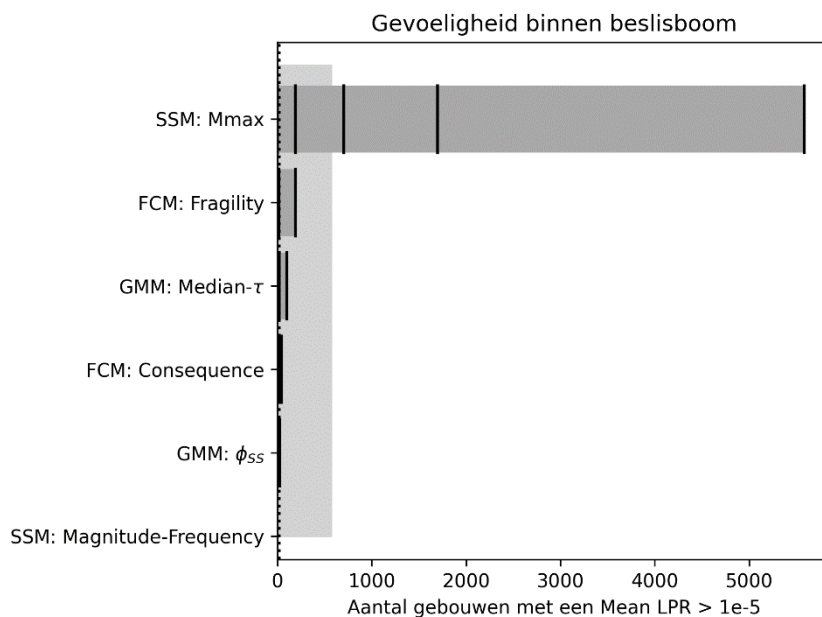
In de publieke SDRA 2022 voldeden bij de berekeningen volgens voorschriften van EZK alle gebouwen ruim aan de Meijdamnorm. In 2023 zijn de voorschriften van EZK voor de modelinstellingen op een aantal punten gewijzigd. Gecombineerd leiden deze veranderde voorschriften tot een hogere inschatting van het veiligheidsrisico. Met name het weglaten van de zogenaamde taper in het Magnitude-Frequentie model en het herintroduceren van de period-to-period correlatie in het ondiepe deel van het grondbewegingsmodel leiden tot een hogere inschatting van het veiligheidsrisico.

6.3 Analyse van epistemische onzekerheden

De TNO Modelketen Groningen is een probabilistisch model dat tot doel heeft onzekerheden zoveel mogelijk in rekenschap te nemen. De totale verdeling van combinaties van de modelalternatieven dan wel alternatieven voor modelparameterkeuze (de aparte takken van de vertakkingsniveaus in de beslisboom) karakteriseert het gezamenlijk bereik van epistemische onzekerheden. 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 6.1](#).

De potentiële bijdrage van een bepaalde tak van een vertakkingsniveau binnen de beslisboom ([Figuur 2.1](#)) wordt berekend uit alle beslisboomtakken die die bepaalde tak van dit vertakkingsniveau bevatten. 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. Het herhalen van deze procedure voor alle risicofactoren en alle takken levert een zogenoemde tornado-plot op van gevoeligheden voor afzonderlijke epistemische onzekerheden. [Figuur 6.1](#) toont voor scenario 1 de resultaten van de gevoeligheid van de afzonderlijke variabelen aan de verwachtingswaarde van het LPR. De gevoeligheid voor de M_{\max} -verdeling is het grootst. Het reduceren van onzekerheid levert doorgaans het meeste resultaat op voor de vertakkingsniveaus die de grootste spreiding laten zien in de gevoeligheidsanalyse.





Figuur 6.1: 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 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 scenario 1, gasjaar 2023/2024.

7 Resultaten risicoanalyse cf. laatste wetenschappelijke inzichten van TNO

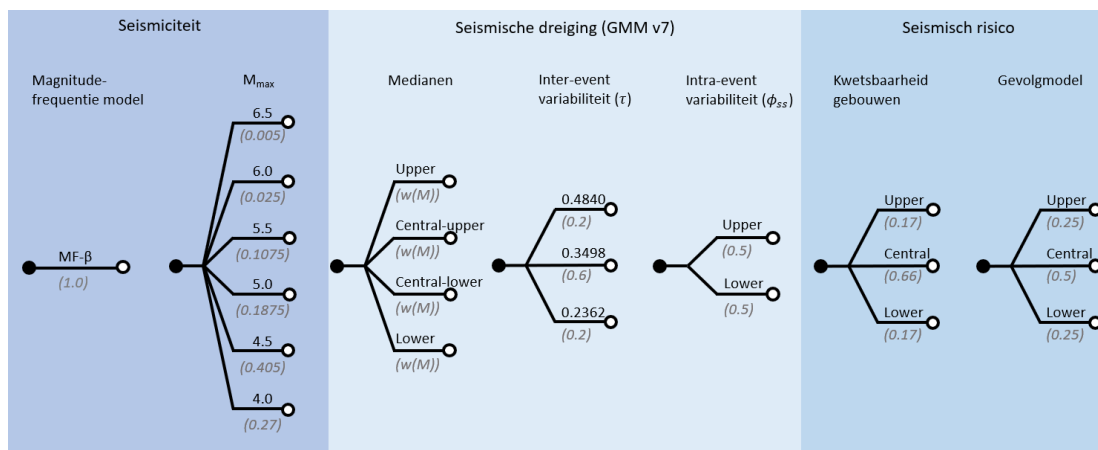
In Hoofdstuk 2 tot en met 5 worden de uitgangspunten en resultaten van de publieke SDRA Groningen 2023 beschreven. Dit hoofdstuk beschrijft de resultaten van een risicoanalyse van de voorgestelde scenario's voor gasjaar 2023/2024, uitgevoerd met de modelinstellingen zoals geadviseerd door TNO in het Statusrapport (TNO, 2022a). 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

TNO heeft geadviseerd de publieke SDRA 2023 uit te voeren zoals beschreven in het Statusrapport (TNO, 2022a). Deze modelinstellingen volgen de meest recente wetenschappelijke inzichten van TNO en wijken op de volgende punten af van de publiek SDRA 2023:

- › Grondbewegingsmodel GMM v7 (Bommer et al., 2022; TNO, 2022b). Verbeteringen van deze nieuwe modelversie zijn onder meer een herziening van het dempingsmodel en de expliciete benadering voor gebouwen die op wierden staan.
- › Kwetsbaarheids- en Gevolgmodel FCM v7 met aangepaste parameterinstellingen naar aanleiding van de resultaten van de TNO-typologie aanpak. Dit model representeert de best beschikbare kennis van de kwetsbaarheid van de Groningse gebouwenpopulatie en is in lijn met uitvoering van de 'Typologie-gebaseerde beoordeling van de veiligheid'.

Doordat de gewichten van de medianen in GMM v7 afhangen van de aardbevingsmagnitudes zijn er zowel praktische als conceptuele problemen bij het bepalen van beslisboompercentielen (bijv. P90) wanneer GMM v7 gebruikt wordt (TNO, 2022b). Voor de berekeningen met TNO-instellingen wordt daarom enkel het gemiddelde LPR over de beslisboom berekend. Dit is in lijn met eerdere adviezen van TNO (2020) om het gemiddelde LPR als risicomaat te hanteren. Tenslotte is de site response variabiliteit niet expliciet uitgesplitst in de beslisboom. Dit heeft geen effect op het berekenen van het gemiddelde LPR. De beslisboom voor de publieke SDRA 2023 volgens de TNO-instellingen is gegeven in [Figuur 7.1](#).



Figuur 7.1: Structuur, waarden en gewichten van de beslisboom (logic tree) voor de publieke SDRA 2023 volgens de TNO-instellingen. De Mmax-aardbevingsmagnitudes en -gewichten zijn herzien ten opzichte van de vorige verdeling (NAM, 2022). Door het toepassen van GMM v7 is de structuur van beslisboom gewijzigd. De medianen en inter-event variabiliteit zijn niet meer 1-op-1 gekoppeld zoals in voorgaande versies van het GMM. Bovendien zijn de gewichten van de GMM mediaan takken afhankelijk van magnitude van de beving. De site-reponse variabiliteit is niet expliciet opgenomen in de beslisboom. Dit is een afwijking van Bommer et al. (2022). Deze keuze heeft geen effect op het gemiddelde risico, maar heeft wel als gevolg dat er in de uitsplitsing van de beslisboom in sectie 7.3 geen uitsplitsing kan plaatsvinden voor deze parameter. Het risico wordt bepaald door het Kwetsbaarheidsmodel van de gebouwen en het Gevolgmodel (kans op overlijden). Het gewicht per tak staat tussen haakjes.

7.2 Resultaten risicoanalyse TNO aanbevelingen

Met betrekking tot het Grondbewegingsmodel (GMM) en het Kwetsbaarheids- en Gevolgmodel (FCM) kijken de TNO aanbevelingen af van de modelinstellingen gebruikt ten behoeve van de publieke SDRA Groningen 2023. De verwachte seismiciteit per scenario is identiek aan de resultaten van de publieke SDRA Groningen 2023. Dit geldt ook voor de DS1 schade prognose. Hoewel resultaten van het GMM voor de DS2 & DS3 schadeprognose worden gebruikt, zijn de resultaten op basis van de TNO aanbevelingen vrijwel identiek aan resultaten van de publieke SDRA Groningen 2023. Deze resultaten zijn daarom niet nogmaals opgenomen in dit hoofdstuk.

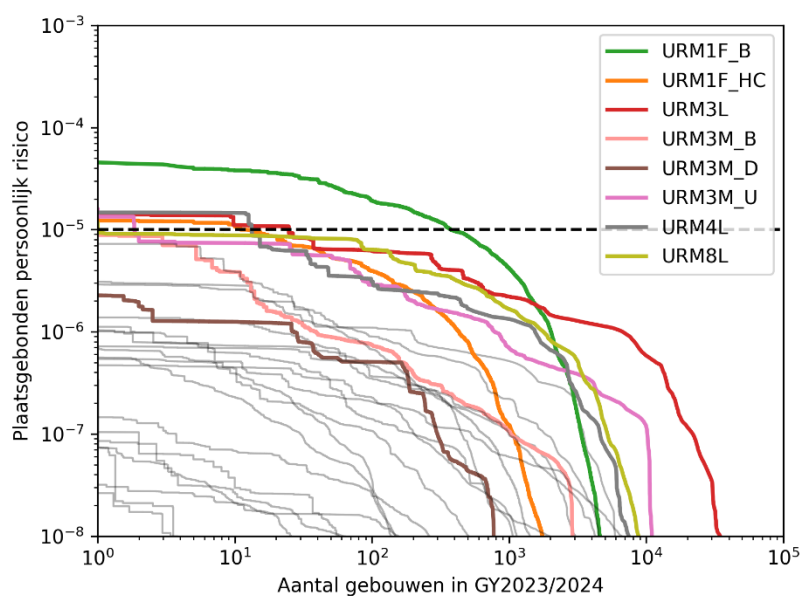
Tabel 7.1 geeft een overzicht van het seismisch risico volgens de TNO-modelinstellingen. Vergeleken met de publieke SDRA Groningen 2023 resultaten leiden de berekeningen op basis van de aanbevelingen van TNO tot een aanzienlijk hogere verwachtingswaarde van het persoonlijk risico. Afhankelijk van het gekozen productiescenario leiden de berekeningen op basis van de aanbevelingen van TNO in totaliteit tot 415 tot 520 gebouwen die niet aan de Meijdamnorm voldoen voor het gasjaar 2023/2024.

In **Figuur 7.2** en **Figuur 7.3** wordt ook de verwachtingswaarde van de LPR voor alle gebouwen per gebouwtype (typologie) getoond voor scenario 1 en scenario 2a. De resultaten van scenario 2b zijn zeer vergelijkbaar met scenario 1 en daarom niet apart weergegeven. Het schuurgedeelte van een boerderij (type URM1F_B) is het meest kwetsbaar (groene curve in **Figuur 7.2**). De huisdelen van deze boerderijen (type URM1F_HC (oranje curve) 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. De verwachtingswaarde van het

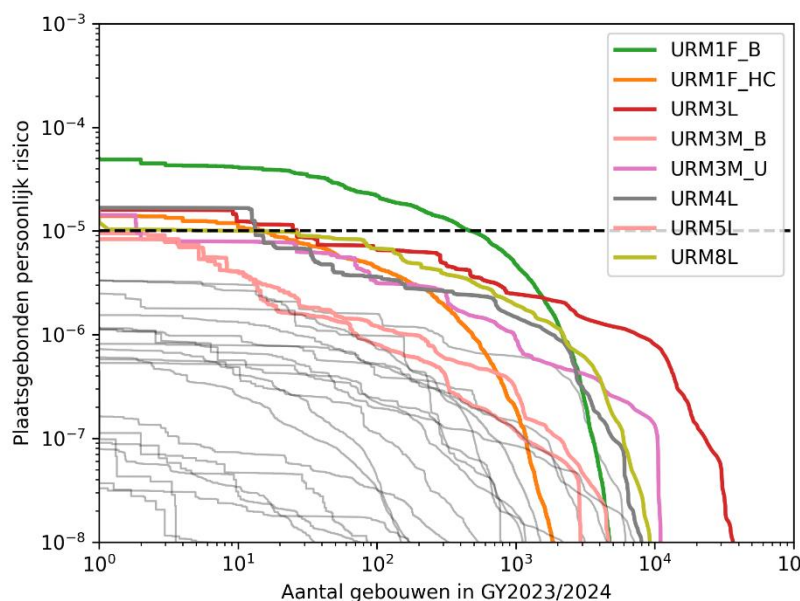
risico voor alle gebouwen van de overige typologieën is aanzienlijk lager dan 10^{-5} per jaar. Voor alle bouwtypologieën neemt het verwachte seismisch risico jaarlijks af.

Tabel 7.1: Het aantal gebouwen per gasjaar waarvoor de verwachtingswaarde van het LPR niet aan de Meijdamnorm (10^{-5}) voldoet voor scenario 1, 2a & 2b volgens TNO-instellingen.

	Verwachtingswaarde LPR $1e-5$		
	Scenario 1	Scenario 2a	Scenario 2b
GY2023/2024	415	520	427
GY2024/2025	330	365	341
GY2025/2026	232	267	239
GY2026/2027	148	175	160
GY2027/2028	98	117	108
GY2028/2029	64	83	78
GY2029/2030	44	52	49
GY2030/2031	32	32	32
GY2031/2032	21	25	22
GY2032/2033	8	13	10
GY2033/2034	1	4	4



Figuur 7.2: LPR-grafiek voor gasjaar 2023/2024 voor scenario 1 (TNO-instellingen) met de verwachtingswaarde per bouwtype (typologie).



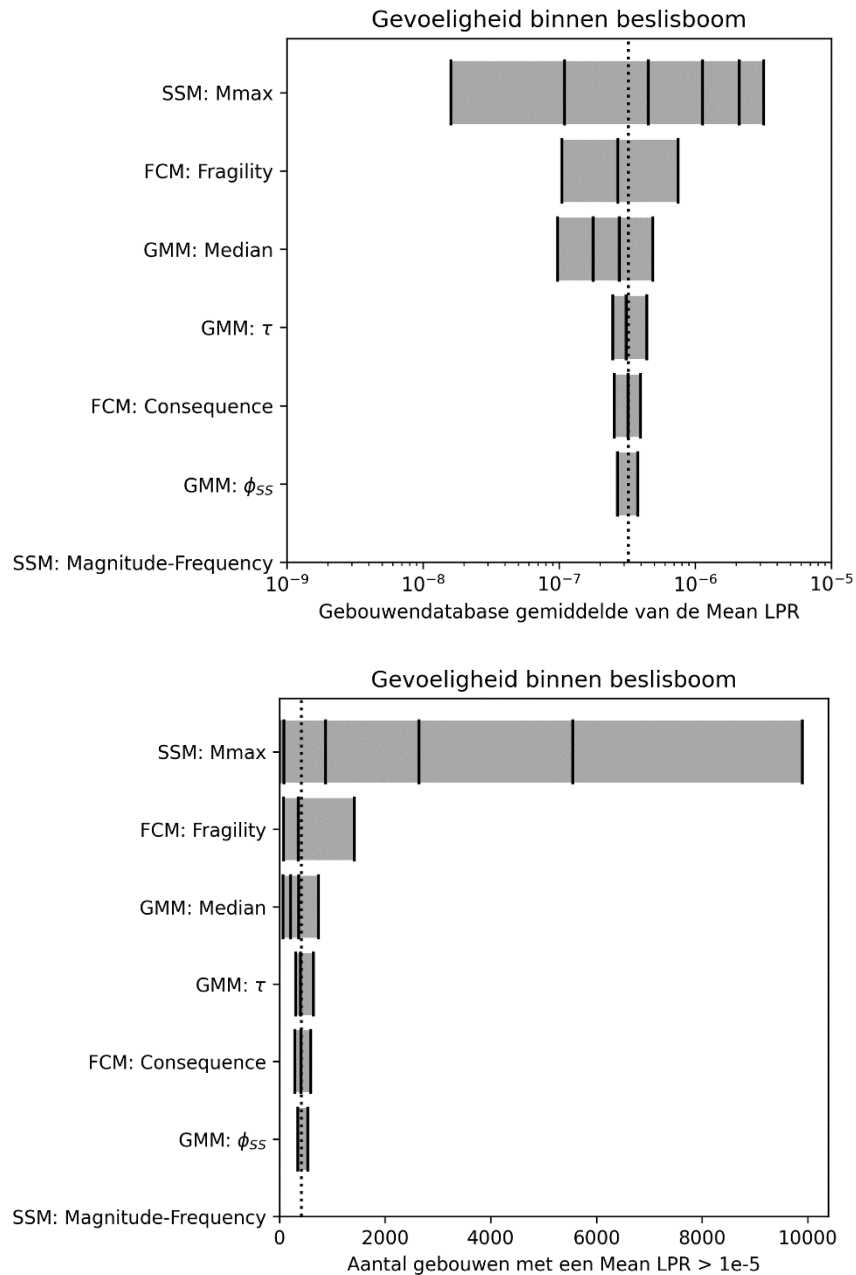
Figuur 7.3: LPR-grafiek voor gasjaar 2023/2024 voor scenario 2a (TNO-instellingen) met de verwachtingswaarde per gebouwtype (typologie).

In vergelijking met de afgelopen jaren laten de resultaten van de TNO aanbevelingen in 2023 een significante verlaging van het risico zien. Ook zijn de resultaten van berekeningen volgens EZK voorschriften en volgens TNO aanbevelingen dicht bij elkaar gekomen. In het bronmodel zijn de EZK voorschriften nu gelijk aan de TNO aanbevelingen, waardoor er op het niveau van seismiciteit nu identieke resultaten berekend worden. De analyses verschillen nog op het punt van het Grondbewegingsmodel (GMM) en het Kwetsbaarheids- en Gevolgmodel (FCM). De hogere risico inschatting als gevolg van de TNO aanbevelingen wordt voornamelijk veroorzaakt door de aangepaste parameterinstellingen in het FCM.

7.3 Analyse van epistemische onzekerheden

De totale verdeling van combinaties van de modelalternatieven dan wel alternatieven voor modelparameterkeuze (de aparte takken van de vertakkingsniveaus in de beslisboom) karakteriseert het gezamenlijk bereik van epistemische onzekerheden. 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 7.4](#)

De potentiële bijdrage van een bepaalde tak van een vertakkingsniveau binnen de beslisboom ([Figuur 7.1](#)) wordt berekend uit alle beslisboomtakken die die bepaalde tak van dit vertakkingsniveau bevatten. 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. Het herhalen van deze procedure voor alle risicofactoren en alle takken levert een zogenaamde tornado-plot op van gevoeligheden voor afzonderlijke epistemische onzekerheden. [Figuur 7.4](#) toont voor scenario 1 de resultaten van de gevoeligheid van de afzonderlijke variabelen aan de verwachtingswaarde van het LPR. De gevoeligheid voor de M_{max} -verdeling is het grootst.



Figuur 7.4: 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 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. Vanwege het toepassen van GMM v7 zijn geen percentielen bepaald op basis van de beslisboom. In vergelijking met Hoofdstuk 6 mist daarom het lichtgrijze vlak dat de P10-P90 van de gehele beslisboom beschrijft. Data voor scenario 1, gasjaar 2023/2024.

7.4 Conclusies aanbevelingen TNO

In vergelijking met de afgelopen jaren zijn de resultaten van de berekeningen volgens EZK voorschriften en volgens TNO aanbevelingen dicht bij elkaar gekomen. In het bronmodel zijn de EZK voorschriften nu gelijk aan de TNO aanbevelingen, waardoor er op het niveau van seismiciteit nu identieke resultaten berekend worden. De analyses verschillen nog op de volgende punten:

- › TNO (2022b) beveelt aan om Grondbewegingsmodel GMM v7 (Bommer et al., 2022) te gebruiken. EZK schrijft GMM v6 voor.
- › In het Kwetsbaarheids- en Gevolgmodel FCM v7 beveelt TNO aan om aangepaste parameterinstellingen naar aanleiding van de resultaten van de TNO-typologie aanpak te gebruiken. EZK schrijft FCM v7 zonder aanpassingen voor.

Ten opzichte van de publieke SDRA 2022 is daarnaast is in alle analyses de Mmax-verdeling aangepast (NAM 2022, TNO 2022a).

We concluderen het volgende:

- › Het verschil in veiligheidsrisico tussen de verschillende scenario's (1, 2a, 2b) volgt direct uit de hoeveelheid gaswinning: minder gaswinning leidt tot een lager veiligheidsrisico.
- › Afhankelijk van het gekozen scenario voldoen 415 tot 520 gebouwen uit de kwetsbaarste typologieën niet aan de Meijdamnorm in het gasjaar 2023/2024.
- › Het verschil in veiligheidsrisico tussen de verschillende scenario's (1, 2a, 2b) is relatief beperkt. De voortdurende seismiciteit worden in het huidige bronmodel voornamelijk veroorzaakt door drukvereffening binnen het gasreservoir. Deze drukvereffening is hoofdzakelijk het gevolg van ruimtelijke drukverschillen die door gaswinning in het verleden zijn ontstaan. Het verschil in veiligheidsrisico tussen volledig insluiten in oktober 2023 (scenario 1) en het openhouden van elf clusters op waakvlamniveau (scenario 2a) heeft slechts beperkt invloed op de toekomstige seismiciteit, en daarmee ook op de seismische dreiging, het veiligheidsrisico, en de gebouwschade.
- › Ten opzichte van de publieke SDRA 2022 laten de TNO-resultaten een afname zien van zowel het gemiddelde LPR als het aantal gebouwen dat niet aan de Meijdamnorm voldoet.
- › De – vergeleken met de EZK voorschriften – hogere inschatting van het veiligheidsrisico in de berekeningen volgens TNO aanbevelingen zijn voornamelijk het gevolg van de aangepaste parameterinstellingen in FCM v7. Deze door TNO aanbevolen aanpassingen representeren de best beschikbare kennis van de kwetsbaarheid van de Groningse gebouwenpopulatie en zijn in lijn met uitvoering van de 'Typologie-gebaseerde beoordeling van de veiligheid'.

Referenties

- Bommer, J., P. Stafford, M. Ntinalexis, (2021). Empirical Equations for the Prediction of Peak Ground Velocity due to Induced Earthquakes in the Groningen Gas Field, 10 October 2021.
- Bommer, J., B. Edwards, P. Kruiver, A. Rodriguez-Marek, P. Stafford, M. Ntinalexis, E. Ruigrok and B. Dost (2022). V7 Ground-Motion Model for Induced Seismicity in the Groningen Gas Field (Revision 1.1), 26 February 2022.
- EZK (2022). Verzoek tot voorstellen operationele strategie voor het gasjaar 2022-2023. Kenmerk DGKE-PDG / 22052133, 15 februari 2022.
- EZK (2023). Verzoek tot voorstellen operationele strategie voor het gasjaar 2023-2024. Kenmerk PDGGO-DSGG / 25984117, 17 februari 2023. Aangevuld met een erratum. Kenmerk PDGGO-DSGG / 26478290, 28 februari 2023.
- GTS (2023). Advies benodigde Groningencapaciteiten en -volumes ten behoeve van leveringszekerheid voor gasjaar 2023/2024. Kenmerk L 23.0046, 31 januari 2023.
- NAM (2022). Report on the Second Workshop on Mmax for Seismic Hazard and Risk Analysis in the Groningen Gas Field. 13-17 June 2022. <https://nam-onderzoeksrapporten.data-app.nl/reports/download/groningen/en/77951661-552a-46bc-9f2e-f1580cd6abc3>
- TNO (2020). Advies vaststellingsbesluit Groningen gasveld 2020/2021, AGE 20-10.043, 11 mei 2020.
- TNO (2022a). Status of the TNO Model Chain Groningen per October 1, 2022 and recommendations for the public Seismic Hazard and Risk Analysis 2023, TNO 2022 R11961, 18 oktober 2022.
- TNO (2022b). Implementation of GMM-V7 in the TNO model chain, TNO 2022 R10801, 18 July 2022.

Ondertekening

TNO › Energy & Materials Transition › Utrecht, 7 april 2023

J.H.J. Ebbing
Hoofd Adviesgroep Economische Zaken a.i.

Bijlage A

Disaggregatie van dreiging

A.1 Disaggregatie van de dreiging voor geselecteerde locaties

De disaggregatie van dreiging geeft inzicht in de herkomst van verschillende variabelen die bijdragen aan de seismische dreiging. Voorbeelden van deze variabelen zijn de aardbevingsmagnitude, 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 we ook de ruimtelijke verdeling van de uitsplitsing voor de drie genoemde bijdragen over het gehele Groningenveld voor gasproductie scenario 2a.

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 **Figuur A.1** en **Figuur 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 herhalingsstijd 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 5.5 beving zijn ongeveer een factor tien lager.

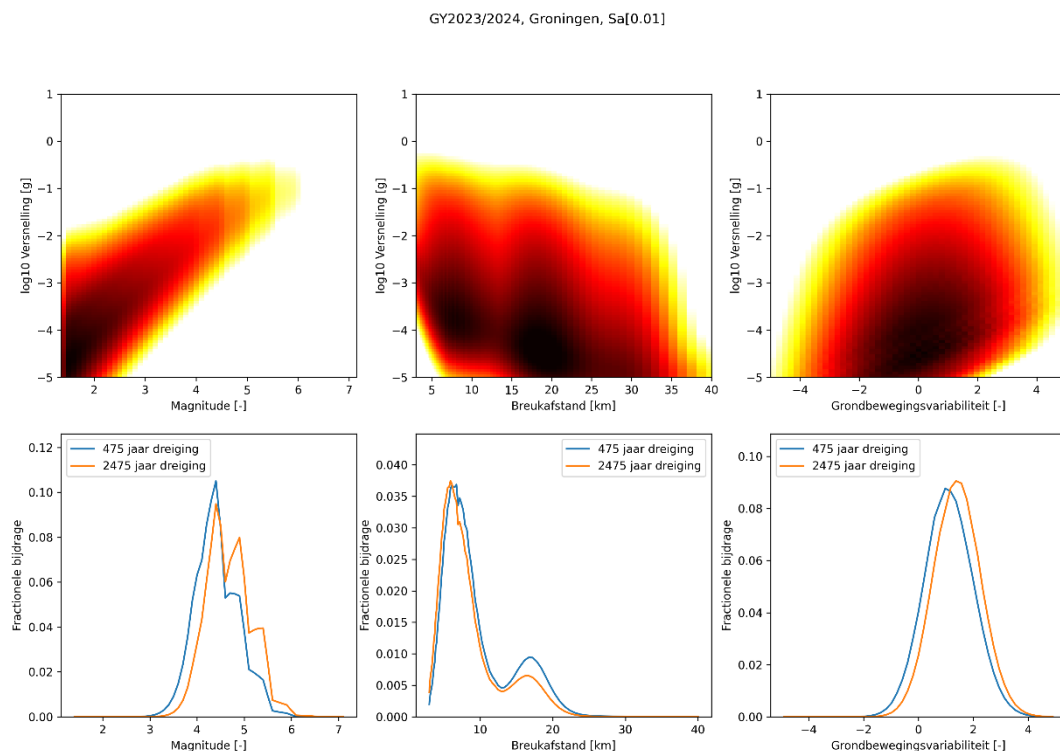
We herhalen deze berekening voor de gezamenlijke verdelingen voor de SA en de afstand tussen het verwachte breukvlak en de locatie op het maaiveld. **Figuur A.1** (midden kolom) laat zien dat de een breuk op een afstand van ongeveer 7 kilometer van Groningen-stad de grootste bijdrage aan de verwachte 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 4.3**.

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 herhalings tijden schuift deze disaggregatie naar rechts (de zeldzamere gebeurtenissen worden belangrijker).

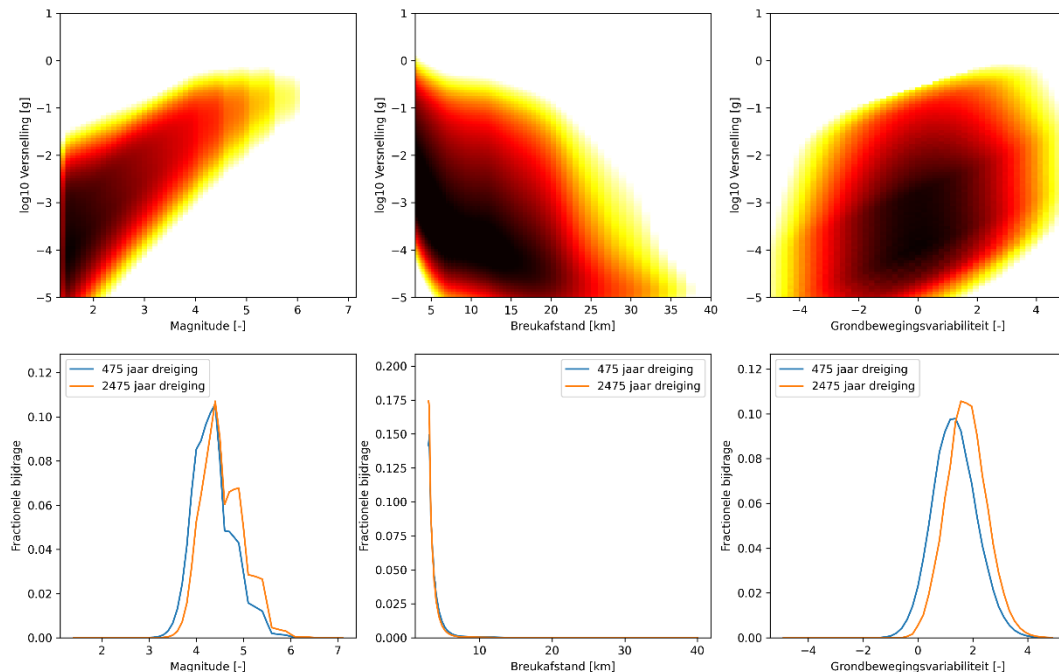
Samengevat demonstreert **Figuur A.1** dat voor Groningen-stad de marginale dreigingsbijdragen gegeven worden door een modale magnitude van 4.2, een primaire modale breukafstand van 7 km, een secundaire modale breukafstand van 18 km en een modale grondbewegingsvariabiliteit van 1 standaarddeviatie boven 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 4.2, 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, 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 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 2023/2024. 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 herhalings tijd van respectievelijk 475 en 2475 jaar. De figuren zijn gebaseerd op de operationele strategie van NAM volgens scenario 2a.

GY2023/2024, Loppersum, Sa[0.01]



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

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 herhalingstijd van 475 jaar komt overeen met een overschrijdingskans van 0,2105% per jaar. Een herhalingstijd van 2475 jaar komt overeen met een overschrijdingskans van 0,0404% per jaar.

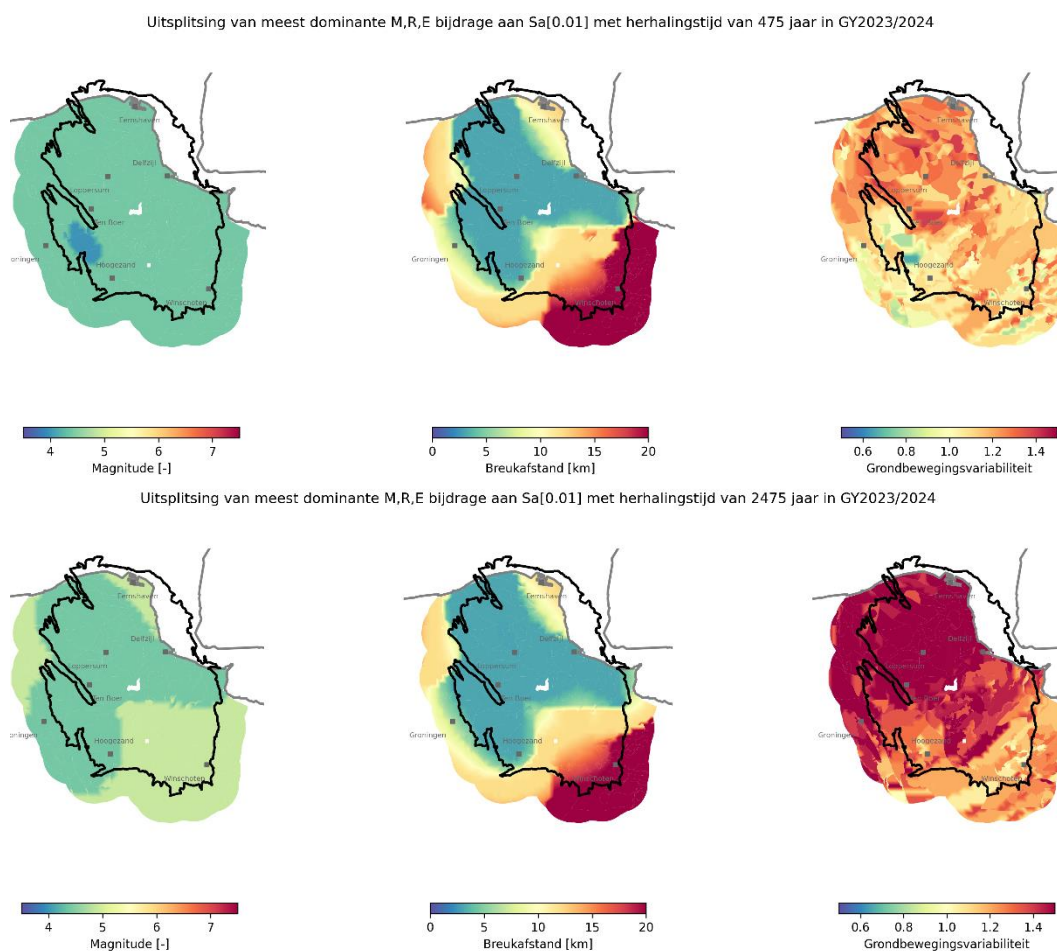
Samenvattend voor de seismisch dreiging met een overschrijdingskans van 0,2105% per jaar, zijn de modale bijdragen aan de seismische dreiging in het gebied te wijten aan verwachte bevingen met magnitudes tussen de 3,9 en 4,5, aan breukafstanden tussen de 3 en 20 km en aan een variabiliteit van grondbewegingen 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 4.2), 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 (> 4.5) 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 grondbewegingsvariabiliteit (rechter kolom) voor een herhalingsijd van 475 jaar (bovenste rij) en 2475 jaar (onderste rij).

Bijlage B

Disaggregatie van risico

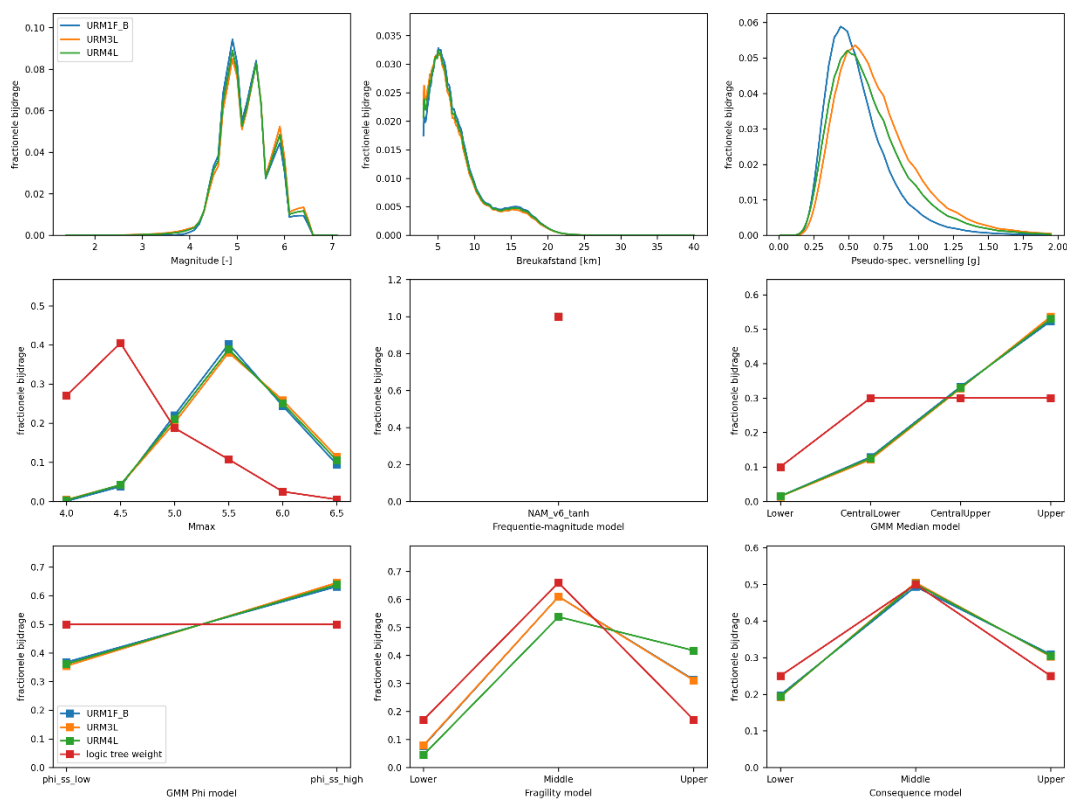
B.1 Disaggregatie van het risico voor geselecteerde typologieën

Vergelijkbaar met de disaggregatie van de seismische dreiging (Bijlage 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) voor scenario 2a. 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 bijvoorbeeld [Figuur 3.5](#)): URM1F_B (de schuur van een boerderij), URM3L en URM4L (gemetselde rijtjeshuizen met grote gevelopeningen op de begane grond).

[Figuur B.1](#) en [Figuur 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 4.8 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. De gemiddelde PSA-risicobijdragen (rechter kolom) laten een duidelijke modus zien rond 0.5 g voor alle typologieën.

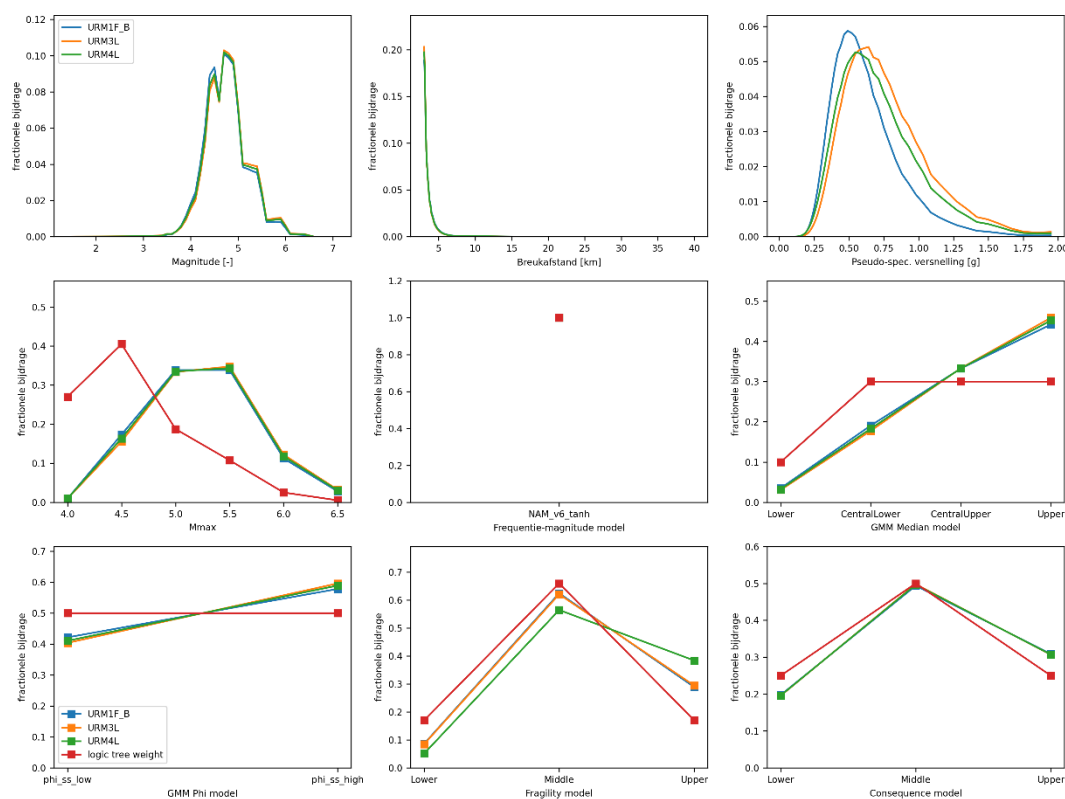
[Figuur B.2](#) toont de resultaten van de uitsplitsing van risicobijdrage voor Loppersum. Voor alle drie de typologieën is de marginale bijdrage van magnitudes aan het gemiddelde LPR bimodaal met de primaire modus op $M = 4.7$ en de secundaire modus op $M = 4.5$. Dit wordt geïnterpreteerd als het gevolg 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 zo'n factor tien verschil is in schaal van de verticale as voor de bijdrage van de breukafstand aan het risico (middelste kolom) tussen [Figuur B.1](#) en [Figuur B.2](#). De verdelingen van de gemiddelde PSA-risicobijdragen vertonen allemaal een goed gedefinieerde modus bij ongeveer 0.5 g.

GY2023/2024, 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 2023/2024 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. Uitgewerkt voor scenario 2a.

GY2023/2024, Loppersum



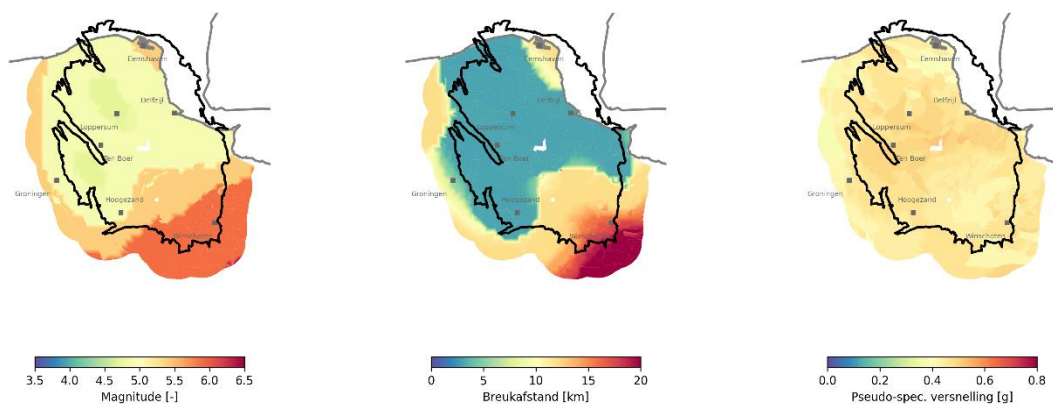
Figuur B.2: Disaggregatie van het seismisch risico voor Loppersum. Onderschrift als in Figuur B.1.

B.2 Ruimtelijke disaggregatie van het risico

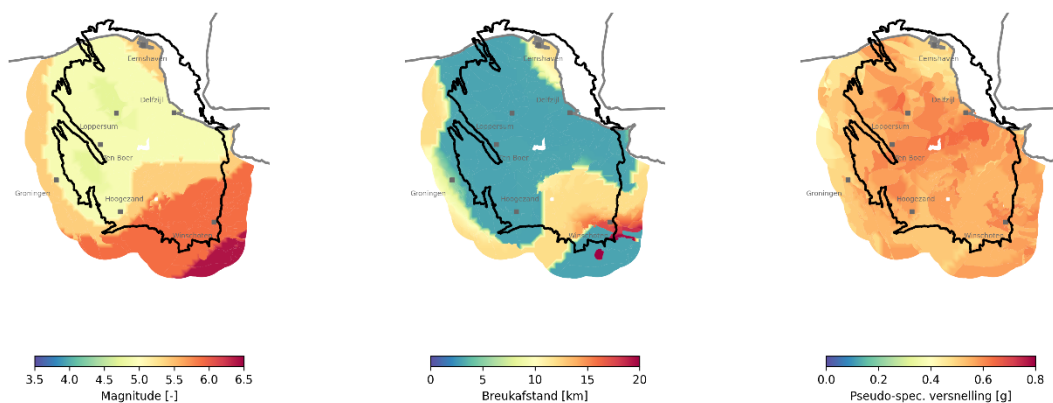
Deze sectie toont de ruimtelijke variatie van de disaggregatie van het seismische risico (LPR) uitgesplitst in magnitude, breukafstand en pseudo spectrale versnelling (PSA) voor scenario 2a. **Figuur B.3** laat zien hoe deze drie bijdragen aan de seismische dreiging variëren over de hele regio voor de 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 5.5. 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 van het veld voor alle drie de typologieën.

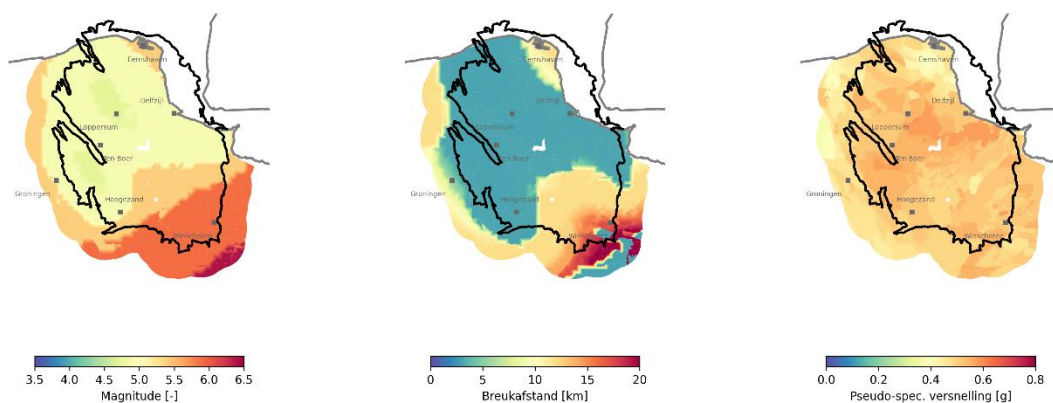
Uitsplitsing van meest dominante M,R,AvgSa bijdrage aan LPR voor URM1F_B in GY2023/2024



Uitsplitsing van meest dominante M,R,AvgSa bijdrage aan LPR voor URM3L in GY2023/2024



Uitsplitsing van meest dominante M,R,AvgSa bijdrage aan LPR voor URM4L in GY2023/2024



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). Uitgewerkt voor scenario 2a.

Bijlage C

Afwijkende risicomaat

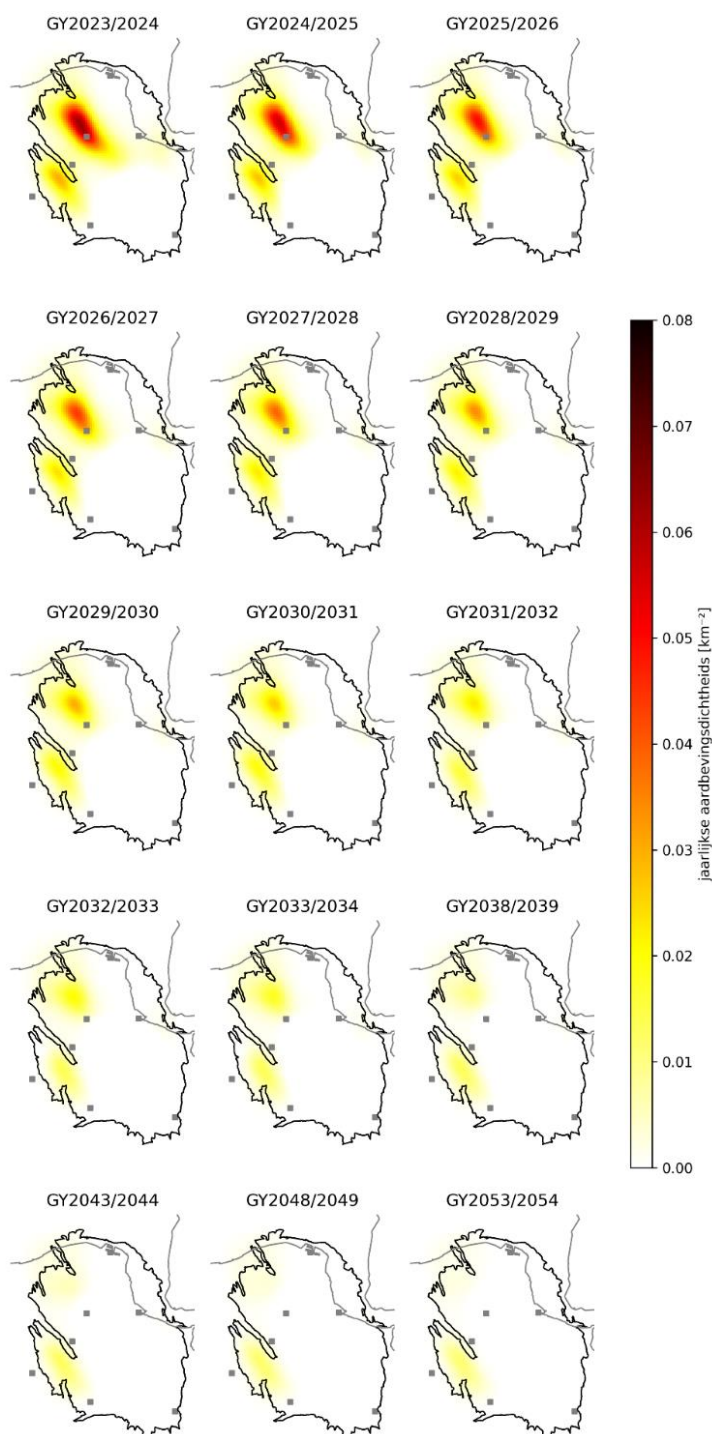
C.1 P90 risico scenario 1, 2a & 2b

Tabel C.1: Het aantal gebouwen per gasjaar waarvoor de P90 van het LPR niet aan de Meijdamnorm (10^{-5}) voldoet voor de EZK-modelinstellingen voor scenario 1, 2a & 2b.

	P90 LPR $1e-5$		
	Scenario 1	Scenario 2a	Scenario 2b
GY2023/2024	572	679	587
GY2024/2025	457	489	475
GY2025/2026	320	388	357
GY2026/2027	209	266	247
GY2027/2028	116	152	126
GY2028/2029	59	89	81
GY2029/2030	29	31	30
GY2030/2031	8	17	17
GY2031/2032	3	6	5
GY2032/2033	0	0	0
GY2033/2034	0	0	0

Bijlage D

Lange termijnontwikkeling



Figuur D.1: Jaarlijkse aardbevingsdichtheidskaarten voor scenario 2a voor gasjaar 2023/2024 tot en met gasjaar 2033/2034 in stappen van één gasjaar, gevolgd door de kaarten tot en met gasjaar 2053/2054 in stappen van vijf jaar.

Energy & Materials Transition

Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht
www.tno.nl