

Zhuldyzay Baki PhD Thesis summary

Summary

This dissertation addresses the critical issue of induced seismicity within the Groningen gas field, one of the largest natural gas reservoirs globally. Since its discovery in the 1960s, the Groningen field has played a pivotal role in meeting the energy needs of the Netherlands. However, decades of sustained gas extraction have resulted in significant seismic activity in what was previously a tectonically inactive region. These induced earthquakes have raised pressing public safety concerns, necessitating a comprehensive understanding of the underlying processes, alongside the development of robust methodologies for monitoring and predicting seismic events.

The aim of this research is to advance the monitoring, analysis, and prediction of seismicity by integrating statistical models with geomechanical insights and decision-making frameworks. Specifically, this study seeks to analyse the spatial and temporal patterns of seismic activity, predict future earthquake occurrences using spatio-temporal models, and optimise production strategies while mitigating seismic risk. Conducted within the framework of the DeepNL programme by the nwo (nwo), this work forms part of a broader effort to deepen understanding of subsurface dynamics influenced by anthropogenic activities.

A multidisciplinary methodological approach was employed to achieve the study objectives. The research relies on an extensive dataset comprising seismic event records provided by knmi (covering magnitudes ≥ 1.5 from 1995 to 2023), historical gas production data, pore pressure measurements from boreholes, and NAM's dynamic reservoir model output. Rigorous data cleaning and integration procedures ensured the datasets' reliability, which formed the basis for subsequent statistical analyses.

The study begins with a detailed temporal and spatial analysis of seismic activity. Temporal trends were examined using Poisson point processes, which allowed for the identification of earthquake timing patterns. Moreover, adaptive kernel estimation techniques were employed to detect spatial clustering of seismic events, particularly in regions experiencing significant pore pressure depletion. Building upon these initial analyses, spatio-temporal Cox processes were applied to model earthquake intensity more comprehensively. This approach was enhanced by incorporating covariates derived from pore pressure estimates using polynomial kriging and Bayesian inference methods, thereby improving the predictive accuracy of seismic hazard assessments.

An important advancement of this research lies in integrating NAM’s dynamic reservoir model with the spatio-temporal Cox process framework. This integration enabled the incorporation of physical processes, such as stress build-up and reservoir compaction, into the statistical models, thus bridging the gap between geomechanical insights and statistical predictions.

To address the practical challenge of balancing gas production targets with seismic hazard mitigation, this dissertation introduces a decision-making framework based on mdpes (mdps). This framework allows for optimising production policies by accounting for seismic risk and resource extraction goals. By formulating and evaluating various production scenarios, the mdp framework provides a structured and data-driven approach to decision-making under uncertainty.

The findings of this research reveal a clear relationship between gas extraction, pore pressure depletion, and seismic activity, with significant clustering of earthquakes observed in regions of pronounced reservoir compaction. The enhanced predictive models, which integrate geomechanical and statistical techniques, offer an improvement in seismic hazard assessments. Furthermore, the decision-making framework demonstrates its utility in supporting safer and more sustainable production strategies.

In conclusion, this dissertation advances the state of knowledge on induced seismicity in the Groningen gas field by presenting a robust, interdisciplinary framework for seismic monitoring, prediction, and mitigation. The integration of statistical models, geomechanical data, and decision-making tools provides a comprehensive approach to managing seismic risk. While the findings are directly relevant to the Groningen gas field, the methodologies developed herein have broader applicability to other regions and contexts where resource extraction induces seismic activity. Future research should focus on incorporating additional geological variables, real-time data assimilation for dynamic hazard assessment, and extending the decision-making framework to other subsurface activities.

Samenvatting

Dit proefschrift behandelt het kritieke probleem van geïnduceerde seismiciteit in het Groningen gasveld, een van de grootste aardgasreservoirs ter wereld. Sinds de ontdekking in de jaren zestig heeft het Groningen veld een cruciale rol gespeeld bij het voldoen aan de energiebehoeften van Nederland. Decennia van aanhoudende gaswinning hebben echter geleid tot aanzienlijke seismische activiteit in wat voorheen een tektonisch inactief gebied was. Deze geïnduceerde aardbevingen hebben geleid tot ernstige zorgen over de openbare veiligheid netgeen, de noodzaak onderstreept voor een diepgaand begrip van de onderliggende processen, naast de ontwikkeling van robuuste methodologieën voor het monitoren en voorspellen van seismische gebeurtenissen.

Het doel van dit onderzoek is het verbeteren van de monitoring, analyse en voorspelling van seismiciteit door statistische modellen te integreren met geomechanische inzichten en besluitvormingskaders. Dit onderzoek richt zich met name op het analyseren van patronen in ruimte en tijd van seismische activiteit, het voorspellen van toekomstige aardbevingen met behulp van ruimtetijd modellen en het optimaliseren van productiestrategieën met inachtneming van seismische risico's. Dit werk, uitgevoerd binnen het kader van het DeepNL-programma van de Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek (NWO), maakt deel uit van een bredere inspanning om het begrip van ondergrondse dynamische processen die worden beïnvloed door antropogene activiteiten te verdiepen.

Om de doelstellingen van het onderzoek te bereiken, is gebruikgemaakt van een multidisciplinaire methodologische aanpak. Het onderzoek is gebaseerd op een uitgebreide dataset die bestaat uit seismische gebeurtenisregistraties van het KNMI (met magnitudes ≥ 1.5 van 1995 tot 2023), historische gasproductiegegevens, poriedrukmetingen in boorgaten en de uitvoer van het dynamische reservoirmodel van de NAM. Zorgvuldige procedures voor het opschonen en integreren van gegevens hebben gezorgd voor betrouwbare datasets die de basis vormen voor daaropvolgende statistische analyses.

Het onderzoek start met een gedetailleerde longitudinale en ruimtelijke analyse van seismische activiteit. Trends in de tijd zijn onderzocht met behulp van Poisson-puntprocessen, waarmee patronen in het optreden van aardbevingen konden worden geïdentificeerd. Daarnaast zijn adaptieve kernschattings technieken toegepast om ruimtelijke ophoping van seismische gebeurtenissen te detecteren, met name in gebieden met aanzienlijke poriedrukvermindering. Voortbouwend op deze eerste analyses zijn in ruimte en tijd Cox-processen ontwikkeld om de intensiteit van aardbevingen gedetailleerd te modelleren. Deze aanpak is verbeterd door het opnemen van verklarende variables die zijn afgeleid van schattingen van poriedruk met behulp van polynomiale kriging en Bayesiaanse methoden, wat de nauwkeurigheid van seismische risicovoorspelling heeft vergroot.

Een belangrijke byrage van dit onderzoek is de integratie van het dynamische reservoirmodel van de NAM in het Cox-proceskader. Deze integratie maakt het mogelijk om fysieke processen, zoals spanningsopbouw en reservoircompactie,

te koppelen aan de statistische modellen. Daarmee wordt de kloof overbrugd tussen geomechanische inzichten en statistische voorspellingen, wat resulteert in nauwkeurigere voorspellingen van seismische activiteit.

Om de praktische uitdaging van het afwegen van gasproductiedoelstellingen en seismische risicobeperking aan te pakken, introduceert dit proefschrift een besluitvormingskader op basis van Markov beslissingsprocessen (MDP's). Dit kader maakt het mogelijk productiebeleid te optimaliseren door rekening te houden met zowel seismische risico's als productiedoelen. Door verschillende productiescenario's te formuleren en te evalueren, biedt het MDP-raamwerk een gestructureerde en datagestuurde benadering voor besluitvorming onder onzekerheid.

De bevindingen van dit onderzoek tonen een duidelijke relatie aan tussen gaswinning, poriedrukvermindering en seismische activiteit, met significante ophoping van aardbevingen in gebieden waar reservoircompactie het sterkst is. De verbeterde voorspellende modellen, die geomechanische en statistische technieken combineren, leveren een substantiële verbetering op in de beoordeling van seismische risico's. Daarnaast bewijst het besluitvormingskader zijn waarde door het ondersteunen van veiligere en duurzamere productiestrategieën.

Concluderend draagt dit proefschrift bij aan de kennis over geïnduceerde seismiciteit in het Groningen gasveld door een robuust en interdisciplinair raamwerk te presenteren voor het monitoren, voorspellen en beperken van seismische risico's. De integratie van statistische modellen, geomechanische data en besluitvormingsmethoden biedt een uitgebreide benadering voor het beheer van seismische risico's. Hoewel de bevindingen direct relevant zijn voor het Groningen gasveld, zijn de ontwikkelde methodologieën breder toepasbaar op andere regio's waar de winning van grondstoffen seismische activiteit veroorzaakt. Toekomstig onderzoek zou zich moeten richten op het integreren van aanvullende geologische variabelen, realtime data-assimilatie voor dynamische risicobeoordeling en de uitbreiding van het besluitvormingskader naar andere ondergrondse activiteiten.