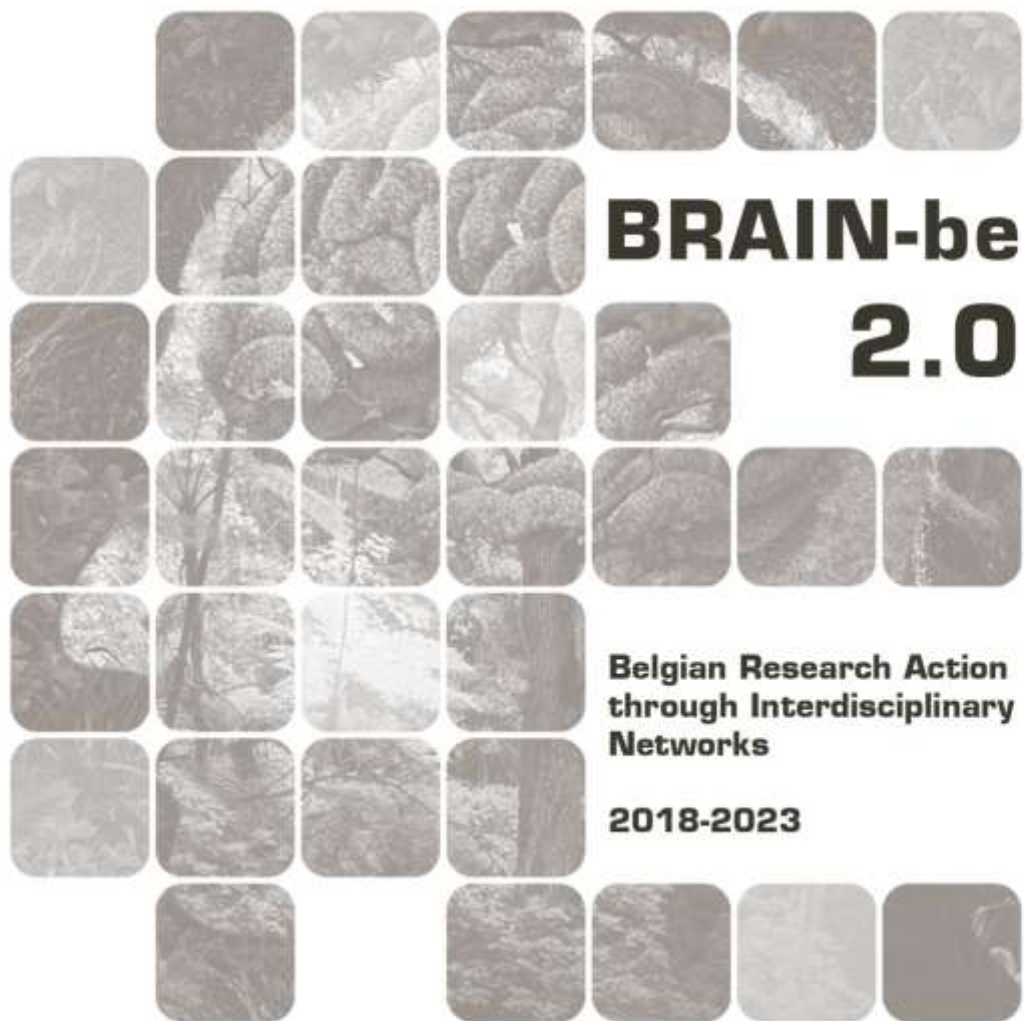




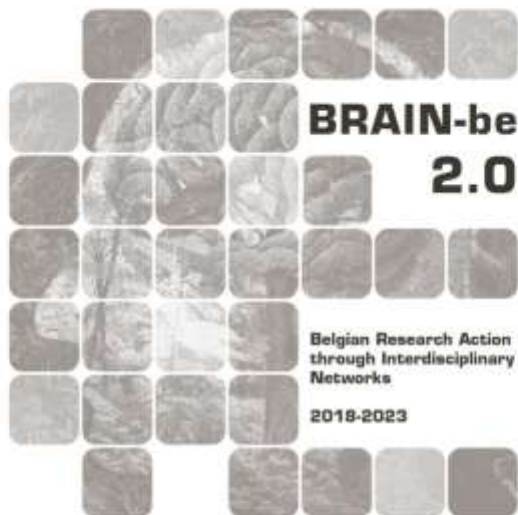
BELSHAKE

Earthquake ground-motion database and modeling in Belgium

Kris Vanneste & Mahsa Onvani (Royal Observatory of Belgium)

Pillar 1: Challenges and knowledge of the living and non-living world





BOTTOM-UP PROJECT

BELSHAKE

Earthquake ground-motion database and modeling in Belgium

Contract - B2/202/P1

SAMENVATTING

PROMOTORS: Kris Vanneste (Royal Observatory of Belgium)

AUTHORS: Kris Vanneste (Royal Observatory of Belgium)
Mahsa Onvani (Royal Observatory of Belgium)

DOI: <https://doi.org/10.24414/w1fn-qy14>





Published in 2026 by the Belgian Science Policy Office

WTCIII

Simon Bolivarlaan 30 bus 7

Boulevard Simon Bolivar 30 bte 7

B-1000 Brussels

Belgium

Tel: +32 (0)2 238 34 11

<http://www.belspo.be>

<http://www.belspo.be/brain-be>

Contact person: Koen Lefever

Tel: +32 (0)2 238 35 51

Neither the Belgian Science Policy Office nor any person acting on behalf of the Belgian Science Policy Office is responsible for the use which might be made of the following information. The authors are responsible for the content.

No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise, without indicating the reference:

Vanneste K. & Onvani M. **BELSHAKE – Earthquake ground-motion database and modeling in Belgium**. Final Report. Brussels: Belgian Science Policy Office 2026 – 138 p. (BRAIN-be 2.0 - (Belgian Research Action through Interdisciplinary Networks))

SAMENVATTING

1.1. Context

België, en meer algemeen Noordwest-Europa, bevindt zich in een stabiele continentale of intraplaatregio, gekenmerkt door een lage tot matige seismische activiteit. Niettemin hebben zich ook bij ons beschadigende aardbevingen voorgedaan. De belangrijkste aardbevingen in de 20^e eeuw zijn die van Zulzeke-Nukerke in 1938 (magnitude $M = 5,0$), Luik in 1983 ($M = 4,6$) en Roermond (NL) in 1992 ($M = 5,3$). Historische bronnen geven aan dat in het verleden grotere aardbevingen hebben plaatsgevonden, zoals de aardbeving van 1580 in het Kanaal ($M \cong 6,0$) en de aardbeving van Verviers in 1692 ($M \cong 6,3$). Dit toont aan dat beschadigende aardbevingen, hoewel zeldzaam, toch in onze regio voorkomen en dat de seismische dreiging dus niet verwaarloosbaar is. Europese seismische dreigingskaarten tonen een verhoogd dreigingsniveau in België in vergelijking met aangrenzende gebieden in Frankrijk, het Verenigd Koninkrijk, Duitsland en Nederland. Seismische dreigingsanalyses (SDA's) vormen een essentieel hulpmiddel voor ingenieurs om aardbevingsbestendige gebouwen en infrastructuur te ontwerpen. Voorbeelden zijn nationale dreigingskaarten ter ondersteuning van de Europese bouwnorm Eurocode 8 en site-specifieke SDA's voor kritieke infrastructuur zoals nucleaire installaties en SEVESO-geclassificeerde industrieën. Een cruciaal onderdeel van SDA's zijn de grondbewegingsmodellen (GBM's): modellen die de grondbeweging veroorzaakt door aardbevingen koppelen aan magnitude, epicentrale afstand en eventueel andere bron-, traject- of site-eigenschappen. Sterke variaties in grondbeweging worden wereldwijd waargenomen, voornamelijk door verschillen in dampingeigenschappen van de aardkorst. Er zijn echter zeer weinig GBM's beschikbaar voor intraplaatgebieden en geen enkele specifiek voor België. Als gevolg daarvan moesten SDA's in België tot nu toe gebruikmaken van GBM's die voor andere gebieden in de wereld zijn ontwikkeld. Hoewel de selectie van GBM's de afgelopen jaren verfijnder is geworden, is hun validiteit voor onze regio's niet getest en blijft hun weging subjectief. Aangezien in probabilistische SDA de grondbewegingstak van de *logic tree* één van de belangrijkste bijdragen levert aan de onzekerheid, bestaat er duidelijk een nood aan grondbewegingsgegevens uit regio's met lage seismische activiteit.

Grondbewegingsdatabanken zijn essentieel voor de ontwikkeling van GBM's. In de afgelopen twee decennia zijn verschillende internationale initiatieven opgezet om *strong-motion*-gegevens te verzamelen, zoals het Amerikaanse *Next Generation Attenuation* (NGA)-project en de opvolgers NGA-West en NGA-East, de KiK-net-database in Japan, de ITACA-database in Italië, de RESORCE-database voor Europa en het Midden-Oosten, en de wereldwijde *Engineering Strong Motion*-database. Deze databanken bevatten voornamelijk gegevens uit de meest actieve seismische regio's, waar aardbevingen talrijker zijn. Een groot aantal GBM's werd uit deze databanken afgeleid. Daarentegen zijn intraplaatgebieden, met hun veel lagere seismische activiteit, sterk ondervertegenwoordigd. Hoewel het merendeel van de waarnemingen in deze gebieden zwakke grondbewegingen betreft van aardbevingen met magnitudes beneden het bereik dat relevant is voor SDA ($M \geq \sim 4,5$), hebben recente succesvolle projecten in Frankrijk, Zwitserland en Australië aangetoond dat het niet alleen haalbaar, maar ook waardevol is om dergelijke studies uit te voeren, en dus ook in België.

1.2. Doelstellingen

Bovenstaande overwegingen vormden de aanleiding voor het opzetten van een specifiek project, BELSHAKE, dat tot doel heeft een kennislacune en een tekort aan gegevensverzameling op het vlak van grondbeweging door aardbevingen te overbruggen. De momenteel beschikbare seismische

gegevens in België worden voornamelijk gebruikt om regionale aardbevingen te detecteren en te lokaliseren, en om hun belangrijkste bronkenmerken (zoals haarddiepte, lokale magnitude en haardmechanisme) te bepalen. Een systematische inventarisatie van deze gegevens ten behoeve van grondbewegingsmodellering werd echter nog niet uitgevoerd. De belangrijkste doelstellingen van het project zijn tweeledig: (1) het opbouwen van een databank met geregistreeerde grondbewegingen door aardbevingen in België en omliggende regio's; (2) het ontwikkelen van de capaciteit om grondbeweging door aardbevingen in België te modelleren op basis van deze databank. Dit zal het mogelijk maken om de validiteit van bestaande GBM's in België te evalueren en uiteindelijk een model te ontwikkelen dat specifiek is voor ons land. De gebruikte methodologieën zijn goed ingeburgerd, maar zijn in de Belgische context slechts gedeeltelijk toegepast. Zowel het thema als de methodes sluiten aan bij de internationale *state of the art*.

1.3. Resultaten

Het belangrijkste resultaat van het BELSHAKE-project is de ontwikkeling van een nieuwe databank met grondbewegingen door aardbevingen in België en omliggende regio's, met name de BELSHAKE-databank. Deze databank is gebaseerd op digitale golfvormgegevens vanaf 1985 en bevat momenteel ongeveer 6400 registraties van 327 tektonische en 17 geïnduceerde aardbevingen met $M \geq 2$. Er werden aanzienlijke inspanningen geleverd om ervoor te zorgen dat zowel de golfvormgegevens, de metadata als de afgeleide intensiteitsmaten (IM's) voldoen aan de *best practices* van internationale grondbewegingsdatabanken. Alle golfvormgegevens werden visueel gecontroleerd, en problemen werden gecorrigeerd of gemarkeerd. Een grote uitdaging vormde de reconstructie van ontbrekende instrumentresponsgegevens voor oudere registraties – informatie die noodzakelijk is om de geregistreeerde grondbeweging om te zetten naar fysieke eenheden en instrumenteffecten te corrigeren. Verschillende methoden werden toegepast en hun validiteit werd op verschillende manieren geëvalueerd. Registraties waarvoor de instrumentrespons onbetrouwbaar bleek, werden in de databank gemarkeerd zodat ze niet meer in volgende stappen gebruikt werden. Alle betrouwbare registraties werden vervolgens verwerkt met een semi-geautomatiseerde, uniforme *workflow*. De verwerkingsstappen en hun volgorde werden licht aangepast op basis van schema's uit gevestigde grondbewegingsdatabanken. Vervolgens werden maximaal 109 intensiteitsmaten berekend, wat resulteerde in meer dan 120.000 registratie–component–tijdvenster combinaties. Verder bepaalden we de momentmagnitudes van 294 aardbevingen in de databank en controleerden we de betrouwbaarheid ervan door verschillende methoden toe te passen en door vergelijking met andere aardbevingscatalogi. Er werden verschillende consistentiecontroles uitgevoerd om de kwaliteit van de IM's te garanderen, waaronder analyse van componentverhoudingen, residuenanalyse ten opzichte van een generiek GBM, vergelijking van stations op dezelfde locatie en vergelijking met gemeenschappelijke aardbevingen in de Franse RESIF/EPOS-France-database. Afwijkende IM's werden geanalyseerd en waar nodig gecorrigeerd of verwijderd. De uiteindelijke residuen vertonen geen waarneembare trend met afstand of magnitude en liggen binnen een smal bereik dat vergelijkbaar is met of zelfs kleiner is dan dat van de Franse databank. De BELSHAKE-databank heeft haar waarde al bewezen: ze maakte een herkalibratie van de Belgische lokale-magnitudeschaal mogelijk, uitgevoerd parallel aan dit project. Dit resulteerde in nieuwe inzichten op het vlak van geometrische spreiding en trajectduur – belangrijke resultaten voor het project.

In het tweede deel van het project analyseerden we eerst de anelastische demping van seismische golven in België via de hogefrequentie-dempingsfactor κ (kappa), die we bepaalden voor alle

registraties in de databank. Analyse van de κ -afstandrelatie met verschillende methoden maakte het mogelijk om κ op te splitsen in een site-specifieke component (κ_0) en een regionale gradiënt (κ_r) in vier geologische domeinen. Onze resultaten tonen dat de variaties in κ_r relatief beperkt zijn, met een gemiddelde dat overeenkomt met een schijnbare (frequentie-onafhankelijke) Q -factor van ongeveer 1750 – wat bevestigt dat seismische damping in België relatief laag is. De vergelijking van site-specifieke κ_0 -waarden met V_{S30} , de gemiddelde schuifgolfsnelheid in de bovenste 30 m, toont relatief constante waarden over een breed bereik voor stations op rotsondergrond. Dit geeft aan dat gesteente met hoge V_{S30} in België niet de lage κ_0 -waarden vertoont die typisch zijn voor hard gesteente in bijvoorbeeld het oosten van Noord-Amerika. Vervolgens evalueerden we de *goodness-of-fit* van meer dan 20 gepubliceerde GBM's ten opzichte van de BELSHAKE-database, met behulp van meerdere statistische maatstaven. Hoewel geen enkel model consequent het beste presteert, vertonen meerdere modellen een goede en stabiele performantie. Een interessant en verrassend resultaat is dat de lage-dampingsversies van NGA-West-modellen voor Californië – een plaatrandgebied – beter aansluiten bij de Belgische gegevens dan de NGA-East-modellen, ontwikkeld voor de intraplaatregio in het oosten van Noord-Amerika. Dit geldt zowel voor absolute waarden als voor de spectrale vorm. Daaropvolgend pasten we de eenvoudige *Referenced Empirical Approach* toe om enkele van de geteste GBM's aan te passen aan de Belgische context. Onze analyses tonen aan dat deze methode voorzichtig moet worden toegepast: enkel modellen die slechts kleine aanpassingen vereisen en waarvan de spectrale vorm niet te sterk afwijkt van de waarnemingen, komen in aanmerking. Daarnaast moet worden geverifieerd dat de residuen geen trend vertonen met magnitude om een vertekening voor hogere magnitudes te vermijden. Desondanks konden drie modellen betrouwbaar worden aangepast. Het meest veelbelovende model dat de beste overeenkomst toont met de BELSHAKE-database is een stochastisch model ontwikkeld voor het Verenigd Koninkrijk. Bovendien konden dankzij internationale gegevensuitwisseling factoren bepaald worden voor de kalibratie van een pan-Europees GBM, met een methodologie die buiten het bereik van het BELSHAKE-project lag. Ten slotte implementeerden we twee methoden, EGF en EXSIM, om grondbewegingen door aardbevingen met hogere magnitudes te simuleren. Als demonstratie simuleerden we realistische grondbewegingen voor de grootste aardbeving in de databank: de aardbeving van Roermond in 1992. Deze toepassing zou niet mogelijk zijn zonder andere projectresultaten, zoals de traject- en sitecomponenten van κ , V_{S30} -waarden voor Belgische stations en de nieuw afgeleide modellen voor geometrische spreiding en trajectduur. Hiermee hebben we de basis gelegd voor stochastische simulatie van accelerogrammen voor hypothetische aardbevingen met hoge magnitude die overeenkomen met de gemiddelde bron-, traject- en sitekenmerken in en rond België.

1.4. Conclusies

De beschikbare seismische gegevens in België zijn tot nu toe onderbenut voor ingenieurs-seismologische toepassingen. In het BELSHAKE-project hebben we de eerste grondbewegingsdatabank ontwikkeld die specifiek voor dit doel dient. Dankzij de kwaliteitsgecontroleerde registraties, geïntegreerde instrumentrespons en uitgebreide metadata vormt de BELSHAKE-databank een waardevolle en hoogwaardige bron voor grondbeweging door aardbevingen in België, zoals blijkt uit de kleine onzekerheden op locaties en magnitudes en de lage residuen. Hoewel het magnitudebereik relatief beperkt is (grotendeels $M \leq 4$), bevat de databank belangrijke informatie over de bron-, traject- en sitekenmerken van grondbeweging in onze regio. Ze vult bestaande databanken aan door de dekking van gebieden met lagere seismische activiteit en van

lage magnitudes te vergroten, en zal als een referentie dienen voor tal van andere seismologische toepassingen, zoals de herkalibratie van de Belgische lokale-magnitudeschaal die parallel aan dit project werd uitgevoerd.

Met behulp van de BELSHAKE-databank hebben we zowel de geometrische spreiding als de anelastische demping in België gedetailleerder dan ooit gekarakteriseerd. De databank maakte het mogelijk om te evalueren welke gepubliceerde grondbewegingsmodellen het best overeenkomen met de waarnemingen, en enkele hiervan konden worden gekalibreerd. Voor het eerst beschikken we nu over GBMs die specifiek op België zijn afgestemd op basis van lokale gegevens. Dit zal leiden tot beter onderbouwde en datagedreven GBM-selectie in seismische dreigingsanalyses. Daarnaast hebben we de capaciteit ontwikkeld om grondbewegingen door aardbevingen met hogere magnitudes te simuleren. Deze ontwikkelingen vormen een stevige basis voor verdere vooruitgang op het vlak van grondbewegingsmodellering in België. Onze resultaten zullen bijzonder waardevol zijn voor toekomstige SDA's in België, zoals nodig voor de herziening van Eurocode 8, alsook voor de verlenging van bestaande of de locatiekeuze van nieuwe nucleaire installaties.

1.5. Trefwoorden

Aardbevingen, grondbewegingsmodel, database, seismische dreiging, seismische demping