

Project VLA07-4.2

Compilatiestudie betreffende de seismiciteit in Vlaanderen

—

Samenvatting

Kris Vanneste¹ (coördinator)

&

Thierry Camelbeeck¹, Walter De Vos², Geert Degrande³, Michiel Dusar², Wim Haegeman⁴,
Mattias Schevenels³, Pascal Vancampenhout², Jozef Van Dyck³ & Koen Verbeeck¹

¹ Koninklijke Sterrenwacht van België, Afdeling Seismologie (KSB)



² Koninklijk Belgisch Instituut voor Natuurwetenschappen
Departement Belgische Geologische Dienst (BGD)



³ K.U.Leuven, Departement Burgerlijke Bouwkunde (K.U.Leuven)



⁴ Universiteit Gent, Vakgroep Civiele Techniek (UGent)



In opdracht van:

Vlaamse Overheid
Departement Leefmilieu, Natuur en Energie
Afdeling Land- en Bodembescherming, Ondergrond en
Natuurlijke Rijkdommen



September 2009

Inhoudsopgave

1. Inleiding.....	5
2. Opdracht.....	5
3. Eurocode 8	6
4. Resultaten en conclusies van de verschillende werkpakketten.....	8
4.1. Aardbevingscatalogus voor Vlaanderen en omgeving (WP5).....	8
4.2. Beschrijving van de belangrijkste aardbevingen in Vlaanderen en omgeving (WP7).....	10
4.3. Seismotektonische zonering van Vlaanderen en omgeving (WP6).....	12
4.4. Kaart seismische gevarenkans op het niveau van de harde sokkel (WP3)	14
4.5. Voorbereidende studie voor de classificatie en cartografie van grondtypes in Vlaanderen volgens Eurocode 8 (WP1)	17
4.5.1. Geofysische proeven ter bepaling van $V_{s,30}$ in Vlaanderen	17
4.5.2. Voorbereidende cartografie van grondtypes in Vlaanderen volgens Eurocode 8	18
4.6. Classificatie en cartografie van liquefactiegevoelige zones (WP2)	23
4.7. Site-amplificatie en seismische microzonering (WP4)	23
4.8. Evaluatie van de actuele herstellingskost van de materiële schade in Vlaanderen veroorzaakt door de aardbeving van 11 juni 1938 (WP8)	25
5. Aanbevelingen voor verder onderzoek	27
6. Structuur van het rapport	29
7. Referenties	30

1. Inleiding

In dit rapport maken we een bilan op van de huidige kennis over de seismische activiteit en de seismische gevarenkans in Vlaanderen en zijn omgeving. Wereldwijd zijn de meeste en de grootste aardbevingen gesitueerd langs plaatranden. Enkele bekende voorbeelden hiervan zijn de San Andreasbreuk in Californië, de Noord-Anatolische breuk in Turkije, de subductiezones rond de Stille Oceaan (de zogenaamde “ring of fire”), de subductiezone ten westen en zuidwesten van Indonesië, enz. Maar ook binnenin de tektonische platen komen aardbevingen voor. Deze zijn weliswaar minder frequent, maar ze kunnen in sommige gevallen significante proporties aannemen en zelfs tot echte rampen leiden. Hier zijn twee belangrijke oorzaken voor: enerzijds worden seismische golven in intraplaatgebieden minder gedempt, waardoor een aardbeving van een bepaalde magnitude (“kracht op de schaal van Richter”) over een groter gebied schade kan veroorzaken dan langs een plaatrand, en anderzijds is de paraatheid van de bevolking er veel minder groot dan in meer actieve gebieden, waar mensen vertrouwd zijn met het fenomeen en er ook aangepaste bouwvoorschriften gelden. Vlaanderen, België en eigenlijk heel Noordwest-Europa bevinden zich in zo’n intraplaatzone, meer bepaald binnen de Euraziatische plaat. De dichtstbijzijnde plaatranden liggen meer dan 1000 km verder, met name in het midden van de Atlantische Oceaan en in een brede zone in het Middellandse Zeegebied.

Hoewel bij ons de algemene opvatting heerst dat aardbevingen hier niet voorkomen, blijkt uit dit rapport dat dit beeld bijgesteld moet worden. Binnen Noordwest-Europa is het ruime gebied rond België één van de meest seismisch actieve. In het verleden, tot zelfs in de 20^e eeuw, zijn er verschillende aardbevingen geweest die ook in Vlaanderen significante schade veroorzaakt hebben. De meest recente waarvan ook het epicentrum in Vlaanderen zelf lag was de aardbeving van 11 juni 1938 in de omgeving van Oudenaarde en Ronse. Nu blijven er nog slechts weinig getuigen van deze aardbeving over en is de impact van zwaardere aardbevingen in het verleden uit ons collectief geheugen verdwenen. Zoals voor de meeste natuurlijke gevaren geldt ook voor aardbevingen dat uit het verleden lessen kunnen getrokken worden voor de toekomst. De tijdsperiode die wordt bestreken door onze kennis over aardbevingen is slechts klein in vergelijking met de duur van de geologische processen (spanningen in de aardkorst) die eraan ten grondslag liggen. Er is dus geen reden om aan te nemen dat dergelijke aardbevingen zich in de toekomst niet zouden kunnen herhalen. Een realistisch beeld van het gevaar door aardbevingen in Vlaanderen is daarom noodzakelijk.

2. Opdracht

De opdracht, zoals gedefinieerd door het Departement Leefmilieu, Natuur en Energie van het Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, omvat twee deeltaken:

- Opstellen van een seismisch-risicokaart. Hierbij worden twee aspecten onderscheiden:
 - Tijdsafhankelijke risico’s die afhankelijk zijn van de geologische ondergrond, grondstabiliteit, bevolkingsdichtheid e.d.
 - Tijdsafhankelijke risico’s die betrekking hebben op de waarschijnlijkheid van het optreden van een aardbeving met een zekere magnitude.
- Compilatie van de aardbevingsgeschiedenis van Vlaanderen en situering binnen de tektonische context.

Bij risico-analyse wordt een onderscheid gemaakt tussen enerzijds de gevarenkans (Eng. *hazard*), de intrinsieke kans op het optreden van het natuurlijk fenomeen dat aan de basis ligt van het gevaar, en anderzijds het risico (Eng. *risk*), de kans op het verlies van mensenlevens of materieel verlies ten gevolge van het gevaar. Risico is het product van de gevarenkans met de aard of waarde van de aan het gevaar blootgestelde bevolking en goederen, en met de kwetsbaarheid ervan.

Van de tijdsonafhankelijke risico's die worden vermeld in de opdracht vallen deze die afhankelijk zijn van de geologische ondergrond en grondstabiliteit onder de noemer seismische gevarenkans, terwijl bevolkingsdichtheid gerelateerd is aan seismisch risico. Waar eerstgenoemde factoren uitgebreid aan bod zullen komen in deze studie, kunnen wij echter niet afzonderlijk ingaan op de tijdsonafhankelijke risico's afhankelijk van de bevolkingsdichtheid, omdat dit slechts één aspect vormt van de kwetsbaarheid van een gebied, terwijl andere aspecten, zoals bv. kwetsbaarheid van gebouwen, onvoldoende gekend zijn. In dit rapport wordt daarom enkel de seismische gevarenkans in al zijn facetten behandeld. Analyse van de seismische gevarenkans is een noodzakelijke eerste stap om tot een volwaardige risico-analyse te komen en onze bedoeling voor deze compilatiestudie is om een overzicht te geven van de huidige stand van zaken op dit vlak.

In de offerte werden de deeltaken opgesplitst in de volgende werkpakketten (WP's):

Deeltaak 1:

- WP1: Voorbereidende studie voor de classificatie en cartografie van grondtypes in Vlaanderen volgens Eurocode 8.
- WP2: Classificatie en cartografie van liquefactiegevoelige zones.
- WP3: Kaart seismische gevarenkans (SH) op het niveau van de harde sokkel.
- WP4: Site-amplificatie en seismische microzonering.

Deeltaak 2:

- WP5: Opstellen van een aardbevingscatalogus voor Vlaanderen en omgeving.
- WP6: Seismotektonische zonering van Vlaanderen en omgeving.
- WP7: Beschrijving van de belangrijkste aardbevingen die een impact hadden in Vlaanderen.
- WP8: Evaluatie van de financiële impact van de aardbeving van 11 juni 1938 in Vlaanderen.

In dit rapport wordt elk werkpakket in een afzonderlijk hoofdstuk behandeld. Om een meer logische structuur te bekomen werd de volgorde van de werkpakketten hierbij echter aangepast (zie §4).

3. Eurocode 8

Bovenstaande overwegingen tonen aan dat paraseismische bouwvoorschriften zich opdringen voor het Vlaams Gewest. In 2004 werd Eurocode 8 of EN 1998, de Europese norm voor het ontwerp van aardbevingsbestendige constructies, goedgekeurd door het Europees Comité voor Normalisatie. De nationale normeringsagentschappen van de verschillende lidstaten, waaronder België, zijn ertoe gebonden deze Europese norm te implementeren en aan te vullen met een nationale bijlage. Een eerste versie van de Belgische nationale bijlage bij Eurocode 8 werd gepubliceerd in april 2002 door het Belgisch Instituut voor Normalisatie (BIN). Een vernieuwde versie zou in de loop van 2009 moeten verschijnen en in 2011 zou Eurocode 8 overal in Europa van kracht worden. Dit document is het enige officiële paraseismische document in België. Zoals bij elke norm uitgevaardigd door het BIN, definieert de inhoud ervan een state of the art die elke competente vakman zou moeten kennen en

toepassen. Nochtans, tot op dit moment is de toepassing van dit document voor een bepaalde constructie niet verplicht, enkel als die verplichting expliciet in het lastenboek voor die constructie staat of in het stedenbouwkundig reglement dat van kracht is op die bouwplaats.

Eurocode 8 bepaalt dat constructies in seismische gebieden ontworpen en gebouwd moeten worden om aan een seismische belasting te weerstaan zonder geheel of gedeeltelijk in te storten. Bij het bepalen van de ontwerpbelasting spelen drie elementen een belangrijke rol:

- De seismische gevarenkans, beschreven aan de hand van de referentie-piekgrondversnelling op hard gesteente. Deze referentie-piekgrondversnelling wordt op nationaal niveau berekend voor een bepaalde referentie-herhalingsstijd (met een aanbevolen waarde van 475 jaar).
- De belangrijkheidsklasse van de constructie. Elke bouwklasse komt overeen met een bepaalde belangrijkheidsfactor, waarmee de referentie-piekgrondversnelling vermenigvuldigd moet worden om de ontwerp-piekgrondversnelling te berekenen.
- Om rekening te houden met de invloed van lokale grondcondities op de seismische belasting ("site-effect") moet bij het ontwerp rekening gehouden worden met de grondcondities. Eurocode 8 voorziet daarom een classificatie van funderingsgronden volgens vijf algemene types (A, B, C, D en E) en twee bijzondere types (S_1 en S_2). De algemene grondtypes worden gedefinieerd op basis van de gemiddelde snelheid van schuifgolven in de bovenste 30 m van de aardkorst, aangeduid als $V_{s,30}$. De bijzondere grondtypes S_1 en S_2 hebben betrekking op de aanwezigheid van respectievelijk zeer plastische lagen en liquefieerbare lagen. Voor elk van de grondtypes A-E definieert Eurocode 8 een bodemfactor S en een elastisch responspectrum. In combinatie met de ontwerp-piekgrondversnelling kan hiermee de ontwerpbelasting voor de betreffende constructie bepaald worden.

De Belgische nationale bijlage bij Eurocode 8 bevat een kaart met de seismische zoneringsdie toelaat om de referentie-piekgrondversnelling te bepalen waarmee rekening gehouden moet worden in een bouwproject. Het document schrijft ook voor onder welke omstandigheden de standaardgrondclassificatie gebruikt mag worden en wanneer specifiek onderzoek van de grondcondities vereist is. Het bevat echter geen kaart met de classificatie van funderingsgronden in België; de bepaling van het grondtype dient in principe door de bouwheer te gebeuren.

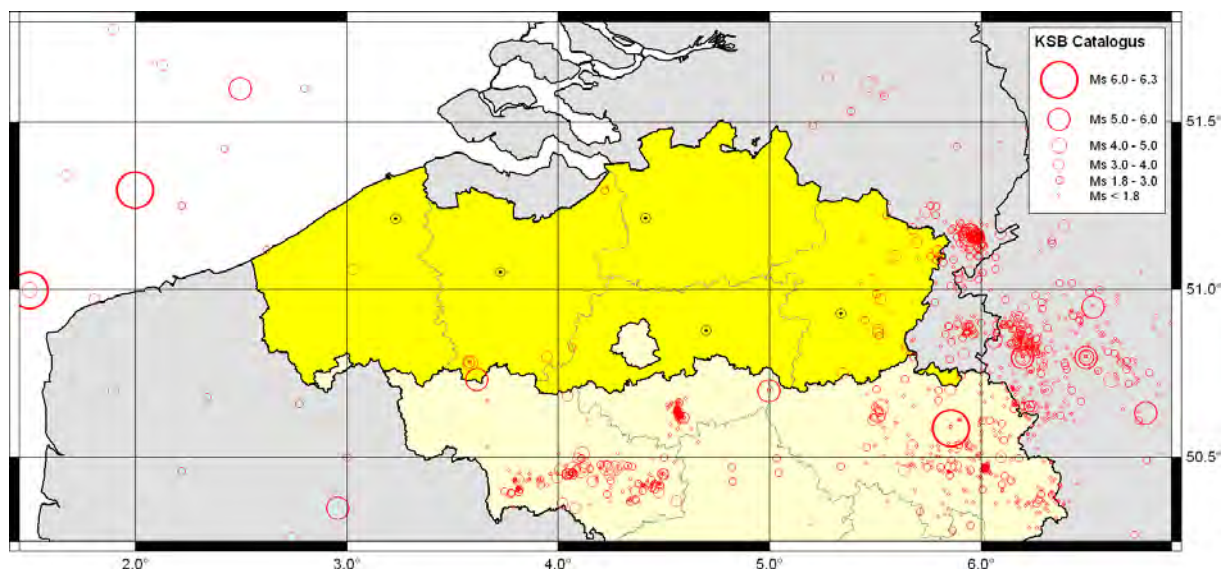
Gezien deze ontwikkelingen leek het ons aangewezen om Eurocode 8 waar mogelijk als leidraad te hanteren bij dit rapport. Vooral deeltaak 1 sluit hier nauw bij aan. De werkpakketten 1 – 4 behandelen verschillende aspecten met betrekking tot Eurocode 8: classificatie van grondtypes (WP1), liquefieerbare gronden (WP2), bepalen van de referentie-piekgrondversnelling (WP3) en analyse van de site-amplificatie voor constructies en/of grondcondities waarvoor de standaard-responspectra in Eurocode 8 niet gebruikt mogen worden. Voor alle duidelijkheid vatten we de relevante bepalingen in Eurocode 8 i.v.m. de seismische belasting samen in een apart hoofdstuk (hoofdstuk 1).

4. Resultaten en conclusies van de verschillende werkpakketten

Hieronder volgt een samenvatting van de belangrijkste resultaten en conclusies van de verschillende werkpakketten. In hoofdstuk 2 bespreken we de aardbevingscatalogus voor Vlaanderen en omgeving (WP5). Deze compilatie van aardbevingen voor de periode 1350-2008 vormt de basis van onze kennis over de seismische activiteit in onze regio. In hoofdstuk 3 volgt een beschrijving van de belangrijkste aardbevingen die een impact hebben gehad (sterk gevoeld of zelfs schade veroorzaakt) in Vlaanderen (WP7). In hoofdstuk 4 kaderen we de seismische activiteit in de context van de tektonische opbouw van de regio en van de geodynamische evolutie (WP6). Op basis daarvan ontwikkelen we een seismotektonisch bronzoneringmodel. In hoofdstuk 5 bespreken we de huidige stand van zaken in de berekening van de seismische gevarenkans in België, die aan de basis ligt van de nationale bijlage bij Eurocode 8 en voeren we nieuwe berekeningen uit voor Vlaanderen met het seismotektonisch bronzoneringmodel en een alternatief tweezonemodell (WP3). Hoofdstuk 6 is een voorbereidende studie voor de classificatie en cartografie van grondtypes in Vlaanderen volgens Eurocode 8 (WP1). In combinatie met de referentie-piekgrondversnelling in de nationale bijlage bepaalt dit grondtype de seismische belasting waaraan gebouwen en constructies moeten kunnen weerstaan. Hoofdstuk 7 gaat dieper in op liquefieerbare gronden, een klasse van funderingsgronden waarvoor volgens Eurocode 8 specifiek onderzoek vereist is (WP2). Hoofdstuk 8 beschrijft de analyse van site-amplificatie, voorgeschreven door Eurocode 8 voor bepaalde grondtypes of voor belangrijke constructies (WP4). In hoofdstuk 9 tenslotte berekenen we de actuele kost van de gebouwschade die werd veroorzaakt door de aardbeving van 1938 in het Vlaams Gewest en maken we een projectie van wat de kost zou kunnen zijn indien deze aardbeving zich nu zou herhalen (WP8). Dit verschaft inzicht in de kwetsbaarheid van onze regio t.o.v. aardbevingen, wat een eerste stap is bij de analyse van het seismisch risico.

4.1. Aardbevingscatalogus voor Vlaanderen en omgeving (WP5)

Op basis van de seismische catalogus van de Koninklijke Sterrenwacht van België werd een aardbevingscatalogus opgesteld voor Vlaanderen en grensgebieden. Deze catalogus bestrijkt de periode van 1350 tot eind 2008 en een rechthoekig geografisch gebied tussen de lengtegraden 1.25°W en 8.75°E en tussen de breedtegraden 49.15°N en 53.30°N. Dit rechthoekig gebied komt ongeveer overeen met de uiterste grenzen van het seismotektonisch bronzoneringmodel (WP6). Zoals de meeste seismische catalogi elders in de wereld is deze aardbevingscatalogus niet homogeen op het vlak van compleetheid, nauwkeurigheid en geografisch bereik. Dit komt omdat de catalogus werd samengesteld op basis van twee totaal verschillende gegevenstypes: metingen door het seismisch netwerk beheerd door de KSB voor aardbevingen vanaf 1910, en historische gegevens die eveneens door de KSB worden verzameld en geanalyseerd voor aardbevingen die teruggaan tot ongeveer 1350. Bovendien is ook de maat voor de aardbevingsgrootte verschillend: magnitude afgeleid uit macroseismische intensiteit voor historische aardbevingen, en lokale magnitude (“kracht op de schaal van Richter”) voor instrumentele aardbevingen. Om de aardbevingen met elkaar te kunnen vergelijken werden deze magnitudes geconverteerd naar eenzelfde schaal, de oppervlaktegolfmagnitude (aangegeven als M_s). Een belangrijke eigenschap van magnitudeschalen is dat ze logaritmisch zijn, dit wil zeggen dat voor een toename met één magnitude-eenheid, de sterkte van de grondtrillingen met een factor 10 toeneemt.

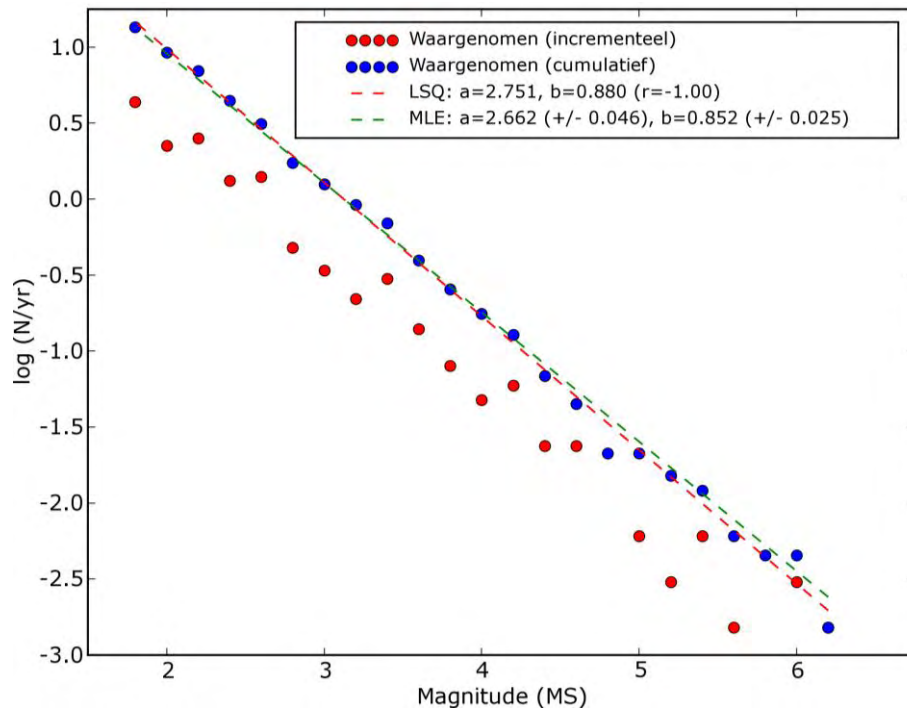


Figuur 1 - Kaart van de aardbevingscatalogus voor Vlaanderen en omgeving

In totaal bevat de aardbevingscatalogus voor Vlaanderen en omgeving 1827 aardbevingen (Figuur 1). De catalogus kan als compleet beschouwd worden voor $M_S \geq 5.0$ vanaf ca. 1350, $M_S \geq 4.0$ vanaf ca. 1925, $M_S \geq 3.0$ vanaf ca. 1960 en $M_S \geq 1.8$ vanaf ca. 1985. De catalogus bevat drie aardbevingen met een magnitude groter dan of gelijk aan 6.0: de aardbevingen van 1382 en 1580 in de zuidelijke Noordzee en de aardbeving van 1692 in de omgeving van Verviers. De magnitude van deze laatste wordt geschat op ongeveer 6.3, de grootste aardbeving in de catalogus. Elf aardbevingen haalden een magnitude tussen 5.0 en 6.0. De grootste aardbeving waarvan het epicentrum in Vlaanderen zelf lag, was de aardbeving van 11 juni 1938 in de omgeving van Ronse, met een magnitude van 5.0. Hoewel de kaart in Figuur 1 lijkt aan te geven dat de aardbevingsactiviteit in Vlaanderen eerder gering is, dient er op gewezen te worden dat de sterke grondbewegingen die door aardbevingen worden veroorzaakt niet ophouden aan de regionale en landsgrenzen. Ook aardbevingen waarvan het epicentrum buiten Vlaanderen ligt kunnen in Vlaanderen schade veroorzaken. De kaart toont dat er zich in de omgeving van Vlaanderen een aantal zones met een grotere activiteit aftekenen. De belangrijkste aardbevingszones zijn de Roerdalslenk in het grensgebied met Nederland en Duitsland, de regio rond Luik en de Hoge Venen, de zuidelijke Noordzee en het Kanaal, en het zuiden van Henegouwen. In WP6 worden de zones van seismische activiteit fijner onderverdeeld en in een tektonisch kader geplaatst.

Zoals werd aangetoond in andere aardbevingsgebieden en ook wereldwijd, vertoont de aardbevingscatalogus voor Vlaanderen en omgeving een karakteristiek verband tussen de magnitude en de frequentie, d.i. het aantal aardbevingen van die magnitude of groter per jaar. Dit komt tot uiting als een lineair verband in de frequentie-magnitudegrafiek van Figuur 2, waar frequentie wordt uitgezet op een logaritmische schaal t.o.v. magnitude. Er is ongeveer een tienvoudige toename van het aantal aardbevingen per afnemende magnitude-eenheid. Omgekeerd geldt, hoe groter de magnitude, hoe zeldzamer de aardbeving. De grafiek geeft aan dat in een ruim gebied rond Vlaanderen en België, aardbevingen gemiddeld volgende frequentie hebben:

- $M_S \geq 2.0$: ± 9 per jaar;
- $M_S \geq 3.0$: ± 1 per jaar;
- $M_S \geq 4.0$: 1 om de 5 à 6 jaar;
- $M_S \geq 5.0$: 1 om de 33 à 47 jaar;
- $M_S \geq 6.0$: 1 om de 225 à 355 jaar.



Figuur 2 - Frequentie-magnitudegrafiek voor de aardbevingcatalogus voor Vlaanderen en omgeving. Blauwe cirkels tonen de cumulatieve waarden (aantal aardbevingen per jaar met magnitude groter dan de gegeven waarde), rode cirkels de incrementele waarden (aantal aardbevingen per magnitude-interval van 0.2 eenheden).

4.2. Beschrijving van de belangrijkste aardbevingen in Vlaanderen en omgeving (WP7)

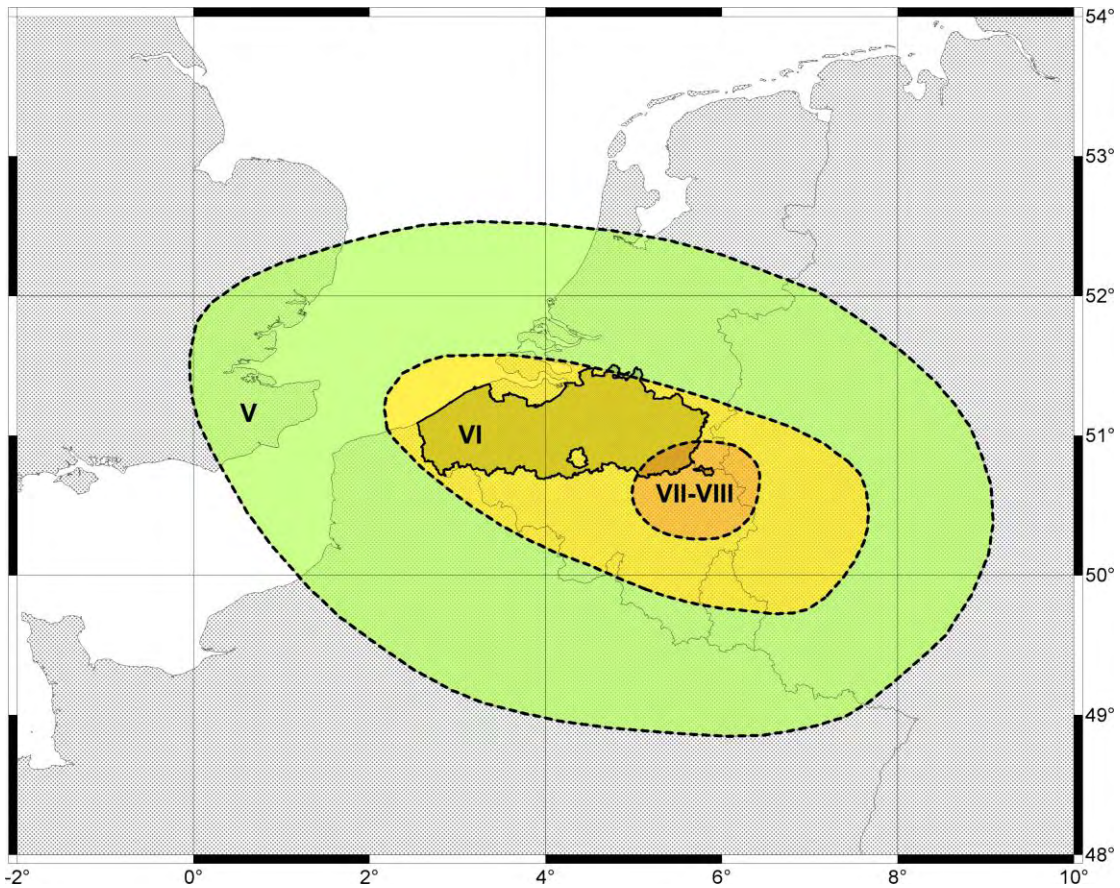
In dit werkpakket beschrijven we de belangrijkste aardbevingen die een impact gehad hebben in Vlaanderen doorheen de gekende geschiedenis. Voor aardbevingen vóór de 20^e eeuw is de informatie afkomstig van historische teksten die werden verzameld en kritisch geanalyseerd door historici van de KSB. Voor aardbevingen sinds 1932 beschikken we over zogenaamde macroseismische enquêtes, dit zijn enquêtes, bij de gemeentelijke overheden of via internet, waarbij gepeild wordt hoe de aardbeving gevoeld werd door de inwoners en welke schade er werd toegebracht aan gebouwen. Deze gegevens laten ons toe de macroseismische intensiteit te evalueren, dit is een maat voor de gevolgen van de aardbeving voor de mens, zijn constructies en zijn natuurlijke omgeving. In tegenstelling tot de magnitude van een aardbeving, varieert de intensiteit van plaats tot plaats. De intensiteit wordt aangeduid met Romeinse cijfers op een schaal van 12 intensiteitsgraden, de EMS-98-schaal, die loopt van I (niet gevoeld) tot XII (totale verwoesting). Er zijn verschillende aardbevingen gedocumenteerd die in Vlaanderen een intensiteit tot VII op de EMS-98-schaal veroorzaakt hebben. Bij deze intensiteit vluchten de meeste mensen in paniek naar buiten. Meubilair verschuift en tal van voorwerpen vallen van rekken of boekenplanken. De meeste goed geconstrueerde woonhuizen lopen matige schade op: er ontstaan kleine barsten in de muren, pleisterwerk en delen van de schoorsteen vallen naar beneden. Bij oudere huizen kunnen grotere barsten in de muren ontstaan en niet-dragende muren verzakken.

In de loop van de 20^e en de 21^e eeuw zijn er een veertiental aardbevingen geweest die in Vlaanderen lokaal (meestal in het oosten van het gewest) of regionaal gevoeld werden. Twee daarvan hebben ook schade veroorzaakt. De meest recente aardbeving die schade veroorzaakte in Vlaanderen was

de aardbeving van 13 april 1992 in Roermond (Nederland), met een magnitude van 5.4. Deze aardbeving werd over het hele gewest gevoeld en in de provincie Limburg liepen een honderdtal woningen lichte schade op. De aardbeving van 11 juni 1938 met epicentrum in de omgeving van Ronse had een vergelijkbare magnitude ($M_S=5.0$), maar veroorzaakte veel meer schade in Vlaanderen en eiste ook minstens twee dodelijke slachtoffers. In een ruim gebied in het zuiden van West- en Oost-Vlaanderen en het zuidwesten van Vlaams-Brabant, onder meer in de steden Kortrijk en Gent, was de schade substantieel (intensiteit VI-VII). In heel Vlaanderen werden meer dan 12000 schoorstenen afgerukt of beschadigd. In WP8 evalueren we de totale kost van de schade aan woonhuizen door deze aardbeving.

Ook in een verder verleden werd Vlaanderen getroffen door een aantal zware aardbevingen waar nu nog weinig mensen weet van hebben. De aardbeving van 23 februari 1828 ($M_S=5.1$), opnieuw vergelijkbaar in grootte met de aardbevingen van Roermond en Ronse, veroorzaakte schade aan huizen en kerken in Vlaams Haspengouw. Het epicentrum lag in Waals Haspengouw, slechts een paar kilometer ten zuiden van het Vlaams Gewest. Van een heel ander kaliber waren de historische aardbevingen van 1692 bij Verviers, van 1580 in het Kanaal en van 1382 in de zuidelijke Noordzee. De geschatte magnitude van deze drie aardbevingen is een grootteorde groter dan de drie eerder vermelde aardbevingen. De aardbeving van 18 september 1692 ($M_S=6.3$) is de grootste aardbeving in ons land tijdens de gekende geschiedenis. Ze veroorzaakte schade over heel Vlaanderen, tot zelfs in het graafschap Kent in Engeland (Figuur 3). De intensiteit bedroeg VII in het zuiden van de provincie Limburg en VI over de rest van het grondgebied. Er is sprake van ingestorte gewelven in kerken in landelijke gebieden, val van vele schoorstenen en beschadigde gevels in meer verstedelijkte gebieden, kastelen die bijna vernietigd zijn, enz. Dergelijke ruimtelijke omvang gaat onze huidige ervaringen ver te boven. De aardbevingen van 6 april 1580 en van 21 mei 1382, respectievelijk in het Kanaal en in de zuidelijke Noordzee, waren iets minder groot ($M_S=6.0$) en veroorzaakten wellicht schade in een groot deel van West- en Oost-Vlaanderen, naast uiteraard ook in Noord-Frankrijk en het zuidoosten van Engeland.

Uit deze opsomming blijkt dat Vlaanderen zeker niet als aardbevingsvrij bestempeld kan worden. Er zijn verschillende aardbevingen gekend die een belangrijke impact hadden in Vlaanderen en in sommige gevallen zelfs substantiële schade hebben veroorzaakt. Deze compilatie leert ons dat ook kleinere aardbevingen lokaal rond hun epicentrum tot hoge intensiteiten en zelfs schade kunnen leiden. Grotere aardbevingen zijn zeldzamer, maar kunnen schade veroorzaken over het gehele grondgebied. Tot nog toe hebben aardbevingen in Vlaanderen en België nog niet veel dodelijke slachtoffers geëist. Het grootste gevaar in onze contreien blijkt niet zozeer te schuilen in de totale instorting van huizen, maar wel in vallend puin afkomstig van schoorstenen, daken en gevels, dat tot ernstige hoofdletsels kan leiden. De les die we hieruit kunnen trekken is dat, zeker in stads- en dorpskernen met rijbouw, onze instinctieve reactie om bij een aardbeving de straat op te vluchten niet de meest aangewezen reactie is.



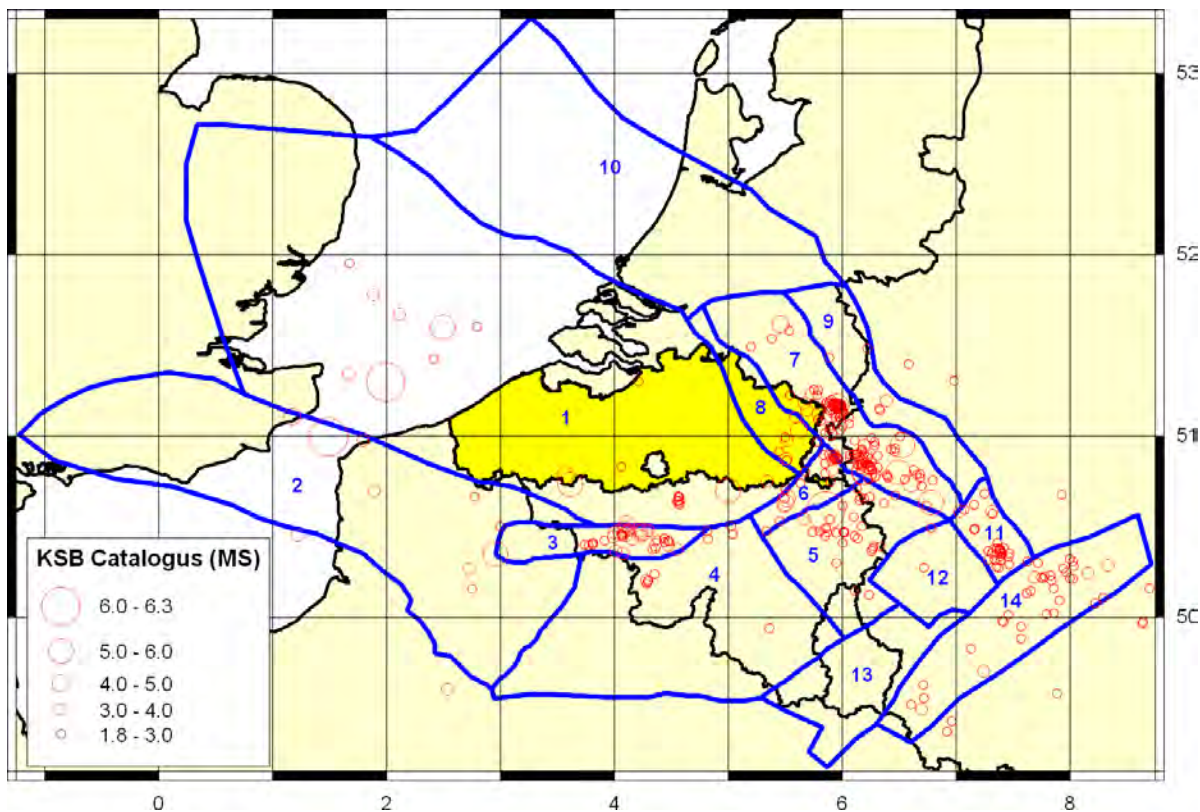
Figuur 3 - Macroseismische kaart voor de aardbeving van 18 september 1692. Naar Alexandre et al. (2008)

4.3. Seismotektonische zonering van Vlaanderen en omgeving (WP6)

Om te begrijpen waar, waarom, wanneer en hoe vaak aardbevingen optreden in een bepaalde regio, dienen we de tektonische situatie, dit is de structuur van de aardkorst en de continue deformatie ervan, te kennen. Deze samenhang tussen seismische activiteit en tektoniek noemen we seismotektoniek. In dit werkpakket hebben we een seismotektonisch zoneringsmodel opgesteld voor Vlaanderen en omgeving op basis van geologische, tektonische, geofysische en seismologische gegevens. Binnen elke zone wordt de seismische activiteit als uniform beschouwd, d.w.z. dat de kans op aardbevingen er overal gelijk is en dat aardbevingen er overwegend dezelfde karakteristieken hebben. In totaal worden 14 seismotektonische zones onderscheiden (Figuur 4, Tabel 1). Voor elke zone wordt in detail beschreven op basis van welke criteria de grenzen werden bepaald en worden er eventuele alternatieve grenzen gesuggereerd. Er wordt een overzicht gegeven van de belangrijkste instrumentele en historische aardbevingen en waar mogelijk van de breuken die deze aardbevingen eventueel veroorzaken. Tot nog toe kunnen enkel in de zone van de Roerdalslenk actieve breuken geïdentificeerd worden. Paleoseismologisch onderzoek heeft aangetoond dat deze breuken in een recent geologisch verleden zware aardbevingen hebben veroorzaakt waarbij de breukverplaatsing zich tot aan het aardoppervlak doorzette ("oppervlakteruptuur"). De sporen daarvan zijn terug te vinden in jonge afzettingen en in het landschap. We geven daarom een kort overzicht van de belangrijkste resultaten van dit onderzoek. Tenslotte evalueren we voor elke zone ook de maximale aardbevingsmagnitudo (M_{max}), op basis van volgende criteria:

- Magnitudo van zware aardbevingen aangetoond door paleoseismologisch onderzoek: enkel van toepassing voor de Roerdalslenk.

- Magnitude van de zwaarste historische aardbeving voor zones waar (tot nog toe) geen geologische aanduiding gevonden werd voor belangrijke actieve breuken. Dit is het geval voor het Anglo-Brabantmassief, de Weald-Artois-zone en het Oostelijk Ardennenmassief.
- Magnitude van de zwaarste historische of instrumentele aardbeving verhoogd met 0,5 magnitude-eenheden: alle andere zones.



Figuur 4 - Seismotektonische zonering voor Vlaanderen en omgeving. Zonenummers zoals in Tabel 1

#	Zonenaam	Brondiepte (km)	Waargenomen Mmax (M _s)	Geëvalueerde Mmax (M _s)	Oppervlakte (km ²)
1	Anglo-Brabantmassief	10	6.0	6.0	52,300
2	Weald-Artois-zone	10	6.0	6.0	24,600
3	Mons-Orchiesbekken	5	4.3	4.8	2,300
4	Westelijk Ardennenmassief	10	3.4	3.9	15,250
5	Oostelijk Ardennenmassief	10	6.3	6.3	5,300
6	Liège-Gulpenzone	5	4.7	5.2	1,350
7	Roerdalslenk	10	5.7	6.7	6,700
8	Oostelijke Kempenzone	10	4.3	4.8	2,250
9	Peel-Venlozone	10	3.4	3.9	3,900
10	West-Nederlands Bekken	n.a.	3.4	3.9	21,250
11	Neuwiedbekken	10	3.5	4.0	1,550
12	Eifelzone	n.a.	2.9	3.4	3,000
13	Trierslenk	n.a.	1.4	1.9	4,950
14	Hunsrück-Taunusmassief	10	4.8	5.3	7,600

Tabel 1 - Belangrijkste parameters van het seismotektonisch zoneringmodel

Een toepassing van dit seismotektonisch model is het gebruik ervan als bronzoneringmodel bij de berekening van de seismische gevarenkans in WP3.

4.4. Kaart seismische gevarenkans op het niveau van de harde sokkel (WP3)

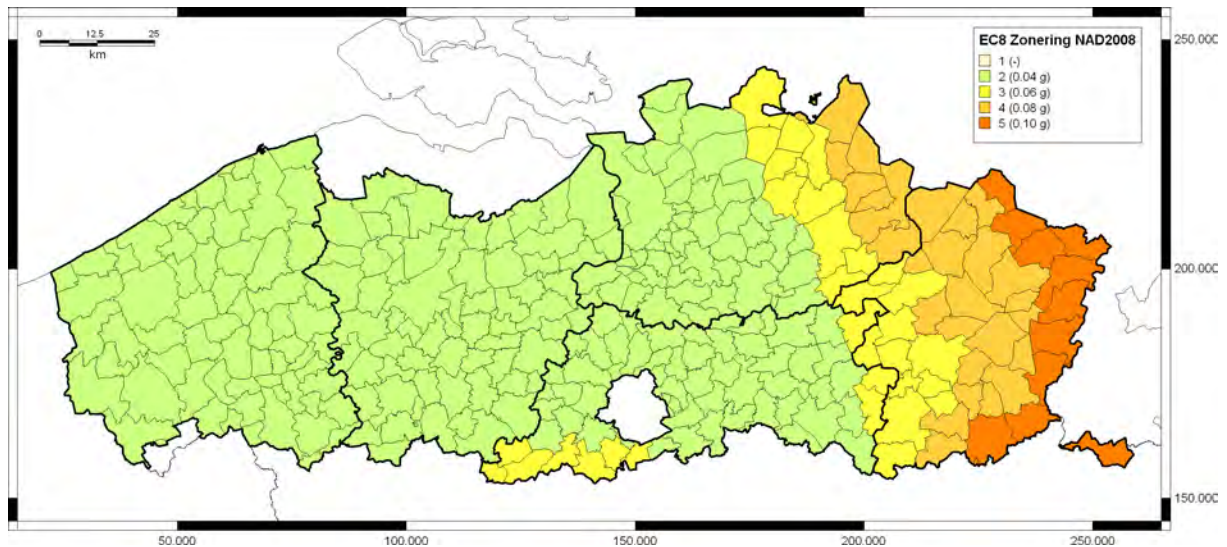
De seismische gevarenkans beschrijft de kans of het gevaar gecreëerd door het natuurlijk voorkomen van aardbevingen in een bepaald gebied en in een bepaalde tijdspanne. Ze wordt bepaald door de frequentie en intensiteit van seismische gebeurtenissen. De seismische gevarenkans wordt meestal beschreven aan de hand van de waarde van een bepaalde grondbewegingsparameter, zoals bv. de piekgrondversnelling (PGA). Deze parameter kan daarna, in combinatie met informatie over het grondtype, door ingenieurs gebruikt worden bij het ontwerp van constructies.

Probabilistische berekeningen van de seismische gevarenkans gaan uit van 3 basiselementen:

- Bronzoneringmodel: definitie van de seismische bronzones waar toekomstige aardbevingen verondersteld worden te zullen optreden.
- Karakterisatie van de seismische activiteit binnen elke bronzone: dit omhelst de berekening van de frequentie-magnitudegrafiek en de evaluatie van de maximale magnitude die er kan voorkomen.
- Selectie van een geschikt grondbewegingsmodel (ook dempingswet genoemd) voor de regio, dat de afname van de amplitude van seismische golven beschrijft in functie van de magnitude van een aardbeving en de afstand tot het epi- of hypocentrum.

Met deze elementen kan dan een kaart berekend worden met de maximale piekgrondversnelling die verwacht kan worden in een bepaalde tijdspanne of herhalingstijd. De referentie-herhalingstijd die wordt aanbevolen door Eurocode 8 bedraagt 475 jaar, wat overeenkomt met een overschrijdingskans van 10% in 50 jaar, de verwachte levensduur voor een gewoon huis. In dit werkpakket geven we eerst een overzicht van de probabilistische berekeningen van de seismische gevarenkans die aan de basis liggen van de Belgische nationale bijlage voor Eurocode 8. Deze berekeningen gaan uit van het bronzoneringmodel van Leynaud et al. (2000), de aardbevingscatalogus van de KSB anno 2000 en de diepte-afhankelijke dempingswet van Ambraseys (1995). Op basis daarvan werd het grondgebied onderverdeeld in seismische zones waarin de referentie-piekgrondversnelling verondersteld wordt uniform te zijn (Figuur 5). Deze zonering is opgenomen in de Belgische nationale bijlage bij Eurocode 8.

Vervolgens hebben we nieuwe probabilistische berekeningen gemaakt van de seismische gevarenkans in Vlaanderen op basis van de bijgewerkte seismische catalogus van de KSB (WP5), en op basis van twee nieuwe bronzoneringmodellen: het seismotektonisch model dat in WP6 werd opgesteld, en een alternatief model dat slechts uit twee zones bestaat, de Roerdalslenk en één grote éénge-maakte zone. We geven hierbij een overzicht van de verschillende elementen die een rol spelen bij dergelijke analyse en van de onzekerheden die ermee gepaard gaan. Om de resultaten te kunnen vergelijken hebben we dezelfde dempingswet gebruikt als bij de studie voor Eurocode 8. Figuur 6 toont de resultaten voor de drie verschillende bronzoneringmodellen.

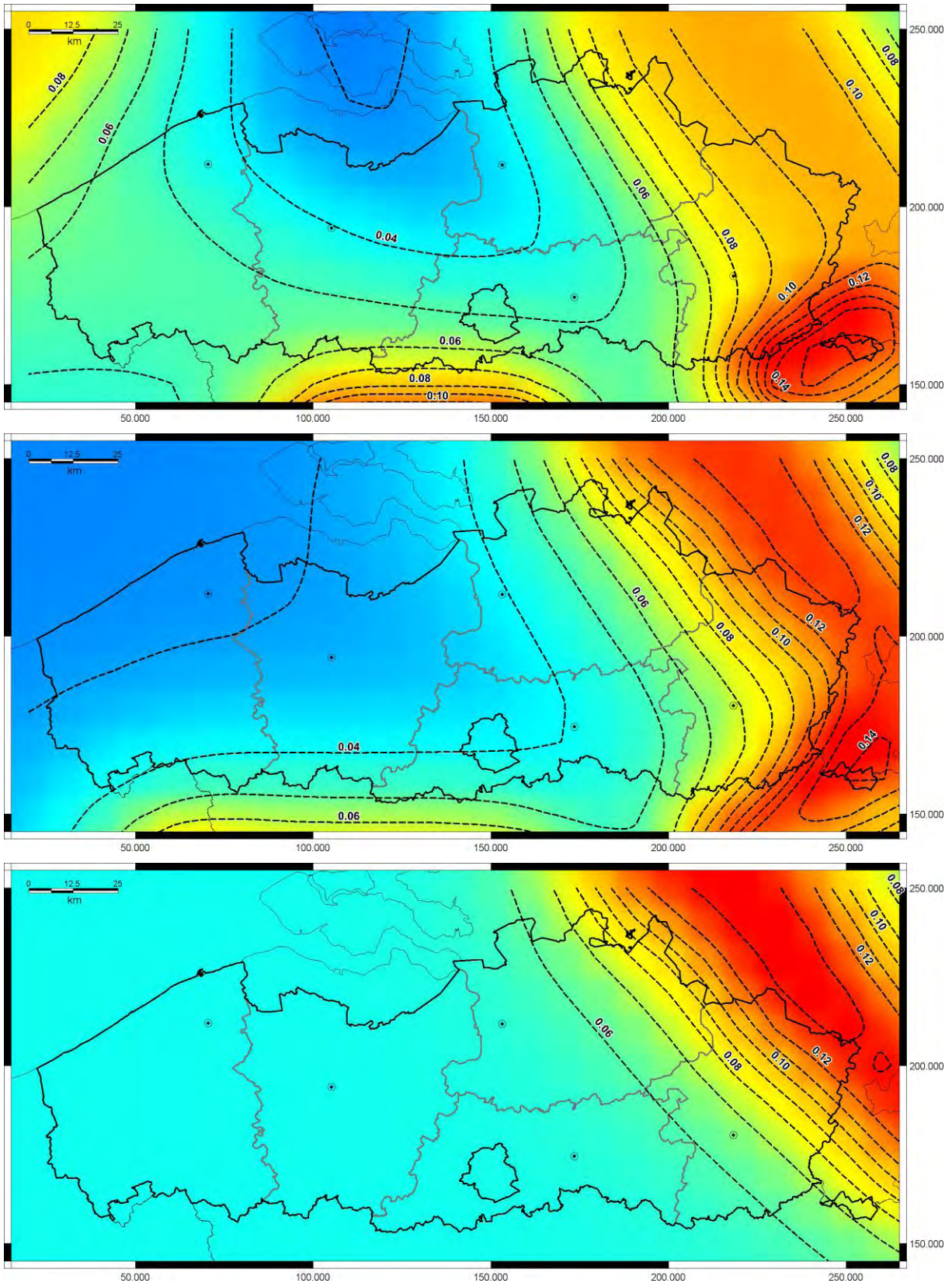


Figuur 5 - Seismische zoneringskaart in Vlaanderen volgens de vernieuwde Belgische nationale bijlage bij Eurocode 8. Merk op dat de referentie-piekgrondversnelling in elke zone gelijk is aan de minimumcontour van de berekende PGA-waarde voor 475 jaar, wat dus in principe een ondergrens vormt

Voor het seismotektonisch model varieert de PGA van 0.03 g^1 in de kustzone, $0.03 - 0.05 \text{ g}$ in West- en Oost-Vlaanderen, het grootste deel van Vlaams-Brabant en de westelijke helft van de provincie Antwerpen, $0.10 - 0.12 \text{ g}$ in het noordoosten en het uiterste zuidoosten van Limburg, en tot slot meer dan 0.13 g in de Voerstreek. De belangrijkste verschillen t.o.v. het bronzoneringsmodel van Leynaud et al. (2000) situeren zich in West- en Oost-Vlaanderen, waar duidelijk lagere PGA-waarden worden berekend, en in het noordoosten van de provincie Limburg, waar de PGA-waarden duidelijk hoger zijn. De verschillen zijn respectievelijk te wijten aan het niet beschouwen van een specifieke bronzone in de Noordzee en aan de geringere brondiepte van de Roerdalslenk in het seismotektonisch model. Bij het tweezonemodel is de geografische verdeling van de PGA-waarden veel uniformer. In het grootste deel van Vlaanderen ligt de berekende PGA tussen 0.05 en 0.07 g . Deze waarde is wel hoger dan bij de andere zoneringsmodellen, wat kan toegeschreven worden aan het feit dat in dit model alle grote aardbevingen buiten de Roerdalslenk overal een even grote kans hebben om voor te komen. De waarden in de zone van de Roerdalslenk zijn nagenoeg identiek aan deze in het seismotektonisch model. Een belangrijk verschil met de andere modellen zijn de relatief lage PGA-waarden ($0.07 - 0.08 \text{ g}$) in het zuiden van Limburg en in de Voerstreek, een gevolg van het feit dat in het tweezonemodel geen aparte, ondiepe bronzone beschouwd wordt voor deze regio. Naar onze mening is het tweezonemodel vooral waardevol wanneer langere terugkeerperiodes beschouwd worden, bv. tot 100.000 jaar bij studies voor nucleaire constructies. Voor kortere terugkeerperiodes is het misschien te simplistisch.

Alle drie de bronzoneringsmodellen tonen een relatief lage seismische gevarenkans in het grootste deel van Vlaanderen, met PGA-waarden tussen 0.04 en 0.08 g . Voor het uiterste oosten van de provincie Antwerpen en in de noordoostelijke helft van de provincie Limburg worden hogere PGA-waarden berekend, tot maximaal $0.12 - 0.14 \text{ g}$. Afhankelijk van het bronzoneringsmodel is dit ook het geval voor het uiterste zuidoosten van de provincie Limburg, met inbegrip van de Voerstreek.

¹ g is de valversnelling, deze bedraagt ongeveer 9.81 m/s^2 .



Figuur 6 - Piekgrondversnelling in Vlaanderen voor een terugkeerperiode van 475 jaar (10% kans op overschrijding in 50 jaar), berekend op basis van het bronzeringsmodel gebruikt in Eurocode 8 (boven), het seismotektonisch bronzeringsmodel (midden) en het tweezonemodel (onder). Het contourinterval is 0.01 g

Er dient echter op gewezen te worden dat deze kaarten niet als definitief resultaat beschouwd mogen worden. In de eerste plaats is een meer doorgedreven analyse wenselijk, waarbij zoveel mogelijk onzekerheidsaspecten in rekening gebracht worden. Ten tweede reflecteren de resultaten slechts onze huidige kennis over de seismische activiteit. We mogen niet uit het oog verliezen dat de historische en instrumentele gegevens waarover we beschikken slechts een korte tijdspanne omvatten en wellicht niet representatief zijn voor de volledige seismische cyclus.

4.5. Voorbereidende studie voor de classificatie en cartografie van grondtypes in Vlaanderen volgens Eurocode 8 (WP1)

Eurocode 8 definieert standaard-responspectra voor vijf grondtypes A-E die worden onderscheiden op basis van de gemiddelde schuifgolfsnelheid in de bovenste 30 m van de stratigrafische kolom ($V_{s,30}$). Met behulp van deze responspectra kan de invloed van de lokale grondcondities in rekening gebracht worden bij het bepalen van de seismische belasting waaraan gewone constructies (bv. woonhuizen en appartementsgebouwen) moeten kunnen weerstaan. De kennis van $V_{s,30}$ is echter nauwelijks voorhanden in Vlaanderen. De geotechnische parameters die beschikbaar zijn in bestaande databanken (o.a. Databank Ondergrond Vlaanderen) betreffen vooral conusweerstand (CPT-tests) en schuifweerstand, maar vrijwel geen directe metingen van de schuifgolfsnelheid. Voorts is het verband tussen conusweerstand en schuifgolfsnelheid vooralsnog onvoldoende gekend om de schuifgolfsnelheid in functie van de diepte te berekenen. Het objectief van WP1 is om een eerste stap te zetten in de richting van de classificatie van de ondergrond in Vlaanderen volgens de grondtypes gedefinieerd in Eurocode 8. Het werkpakket is onderverdeeld in twee delen. In een eerste deel wordt nagegaan welke geofysische proeven geschikt zijn voor de bepaling van $V_{s,30}$ en worden de resultaten geëvalueerd voor een aantal sites bestudeerd waar deze gegevens voorhanden zijn. Dit kan de basis vormen voor een studie van de relatie tussen de schuifgolfsnelheid en de geologische opbouw van de grond. In het tweede deel wordt een 3D-model opgemaakt van de lithologische opbouw van de ondergrond in Vlaanderen tot een diepte van 30 m, dat kan dienen als basis voor de cartografie van grondtypes volgens Eurocode 8. Vervolgens wordt geprobeerd om hieruit op twee verschillende manieren dergelijke grondtypenkaart af te leiden: op een semi-empirische manier, door vergelijking met de stratigrafische beschrijving van de grondtypes in Eurocode 8, en op een empirische manier, door koppeling met de beschikbare gegevens over $V_{s,30}$ in deel 1 van het werkpakket. Deze tweede methode geniet in principe de voorkeur omdat $V_{s,30}$ de bepalende parameter is bij de definiëring van de grondtypes, maar omdat hiervan onvoldoende gegevens beschikbaar zijn moeten beide kaarten als louter informatief beschouwd worden.

4.5.1. Geofysische proeven ter bepaling van $V_{s,30}$ in Vlaanderen

In het eerste deel van dit werkpakket is een rapport opgesteld met een bespreking van een aantal geofysische proeven uitgevoerd op vijf verschillende sites in Vlaanderen gedurende de laatste vijftien jaar. Dit rapport moet een uitgangspunt vormen voor de classificatie van gronden volgens Eurocode 8.

Het eerste doel is na te gaan welke geofysische proeven geschikt zijn voor de bepaling van de gemiddelde schuifgolfsnelheid $V_{s,30}$. De geofysische proeven die in het rapport aan bod komen zijn de seismische refractietest, de (actieve en passieve) spectrale analyse van oppervlaktegolven (Spectral Analysis of Surface waves, SASW), de seismische sondeerproef (Seismic Cone Penetration Test, SCPT) en de cross-hole proef.

Het tweede doel is de basis te vormen voor een studie van de relatie tussen de schuifgolfsnelheid en de geologische opbouw van de grond. Een dergelijke relatie moet toelaten geologische data te gebruiken ter bepaling van het grondtype volgens Eurocode 8. Geologische data zijn in ruime mate beschikbaar, wat de cartografie van grondtypes in Vlaanderen mogelijk maakt op voorwaarde dat er representatieve geofysische proeven voorhanden zijn.

De resultaten kunnen als volgt samengevat worden:

- De seismische refractieproef wordt gebruikt ter bepaling van de longitudinale golfsnelheid, en kan dus niet gebruikt worden ter bepaling van de gemiddelde schuifgolfsnelheid $V_{s,30}$.
- De nauwkeurigheid van de SCPT neemt toe met de diepte, maar de penetratiediepte is vaak beperkt door de aanwezigheid van harde lagen. Een penetratiediepte van 30 m vereist het gebruik van een voldoende zware sondeerwagen.
- Met de cross-hole proef is de bepaling van de gemiddelde schuifgolfsnelheid $V_{s,30}$ zeker mogelijk, maar het is een dure proef doordat er minstens twee boorgaten nodig zijn.
- De bepaling van de gemiddelde schuifgolfsnelheid $V_{s,30}$ op basis van een actieve SASW-proef is niet haalbaar.
- De passieve SASW-proef aangevuld met een actieve SASW-proef maakt het mogelijk de gemiddelde schuifgolfsnelheid $V_{s,30}$ te bepalen. De bruikbaarheid van een passieve proef alleen (zonder actieve proef) is niet nagegaan in het kader van dit werkpakket.

Er kan besloten worden dat de passieve SASW-proef (al dan niet aangevuld met een actieve SASW-proef) één van de meest geschikte methodes is ter bepaling van de gemiddelde schuifgolfsnelheid $V_{s,30}$.

Op basis van deze resultaten worden de volgende suggesties voor verder onderzoek geformuleerd:

- Bijkomend onderzoek van de passieve SASW-proef is nodig: het dient onderzocht te worden of het nodig is deze proef aan te vullen met een actieve SASW-proef om te komen tot een goede schatting van de gemiddelde schuifgolfsnelheid $V_{s,30}$.
- De selectie van sites die besproken worden in het rapport kan uitgebreid worden. Hiertoe kan gebruik gemaakt worden van de resultaten van een aantal proeven die in het verleden uitgevoerd zijn, of er kunnen bijkomende proeven uitgevoerd worden.
- De relatie tussen de schuifgolfsnelheid en de geologische opbouw van de grond dient verder bestudeerd te worden (waarbij gefocust moet worden op grondtypes die courant voorkomen in Vlaanderen).

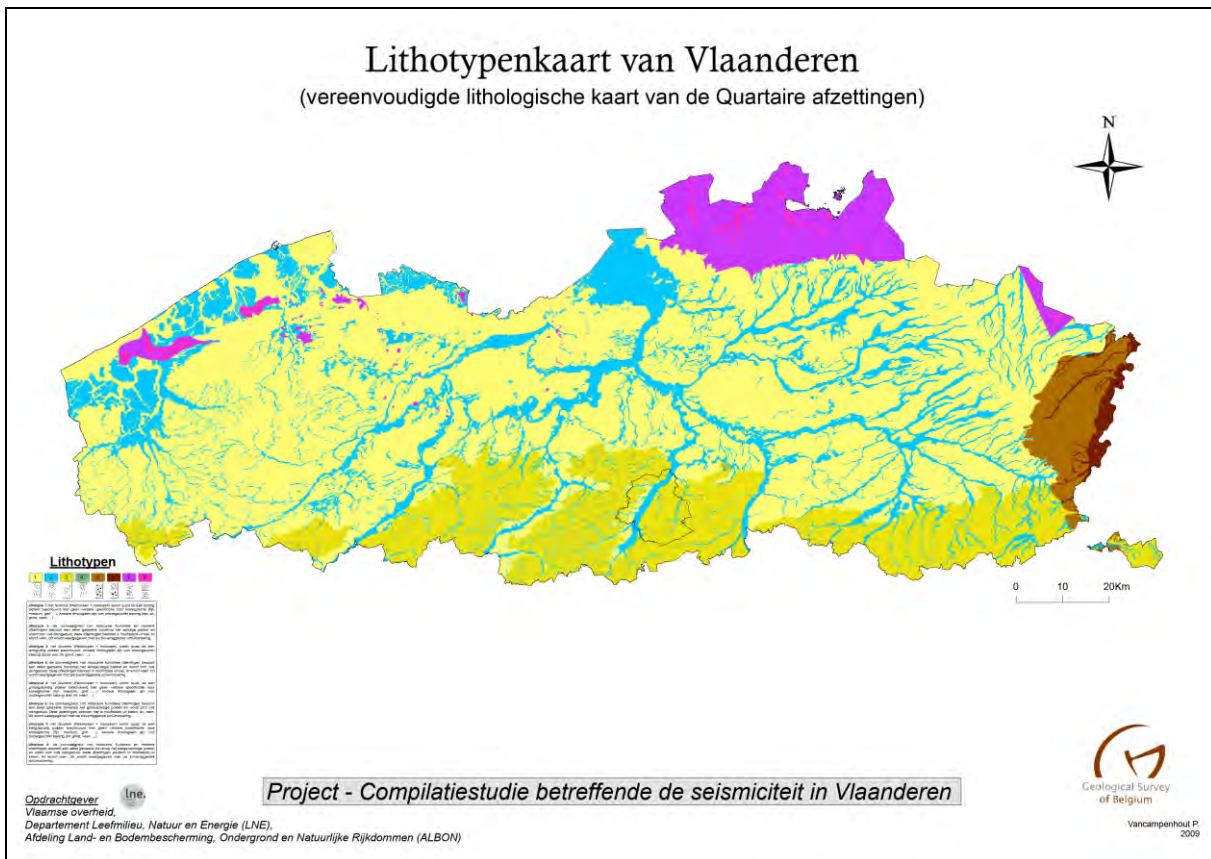
4.5.2. Voorbereidende cartografie van grondtypes in Vlaanderen volgens Eurocode 8

Het doel van dit tweede deel van werkpakket 1 is het opmaken van een 3D-model van de lithologische opbouw van de ondergrond in Vlaanderen tot een diepte van 30 m, dat kan dienen als basis voor de cartografie van grondtypes volgens Eurocode 8. Er is echter geen enkele plaats waar de bodemlaag over een dikte van 30 m uniform en homogeen is. Het is daarom nodig een lithologische profieltypenkaart van de bovenste 30 m op te stellen. Dit is geen eenvoudige procedure omdat het landoppervlak niet egaal is en bijgevolg ook de basis van de 30-meter-zone een golvend verloop heeft, terwijl de lithologische grensvlakken er niet parallel aan liggen en zelfs vaak de geometrische begrenzing van de 30-meter-zone zullen doorsnijden. In de bovenste 30 meter kunnen geheel ver-

schillende geologische lagen voorkomen, gaande van zeer recente Quartaire afzettingen, over Tertiaire en Mesozoïsche lagen, tot de oudste gesteenten van het land die tijdens het Cambrium zijn afgezet, zo'n 550 miljoen jaar geleden. Deze lagen vertonen sterke verschillen in geometrisch verloop en geotechnische eigenschappen. Tot nog toe waren deze niet samen gekarteerd maar het voorwerp van verschillende thematische karteringen (Quartairkaart, Tertiairkaart, kaart van de sokkel). De profieltypenkaart is een origineel werk; de resulterende cartografie, met inbegrip van de kaarten opgemaakt in de tussenstappen, geeft nieuwe geologische informatie die enerzijds ook buiten dit project gebruikt kan worden en anderzijds op flexibele wijze kan worden aangepast aan nieuwe of meer gedetailleerde inzichten in de relatie tussen stratigrafie en geotechnische parameters.

De kartering gebeurde in verschillende stappen. In een eerste fase werd een driedimensionaal model opgemaakt van de bovenste 30 m van de Vlaamse bodem, op basis van het digitaal hoogtemodel, het Vlaams Grondwatermodel en de Quartairgeologische overzichtskaart van Vlaanderen. Er wordt gewerkt met een gebiedsoverdekkend raster met een resolutie van 100 x 100 m, hetgeen de resolutie is van de data van de eerste twee vermelde bronnen. Het Vlaams Grondwatermodel heeft evenwel slechts een gegevensdichtheid van 1 punt (boring) per 2 km² zodat de kartering minder nauwkeurig is dan bijvoorbeeld de Quartairgeologische overzichtskaart van Vlaanderen, waarbij een grotere gegevensdensiteit gehanteerd werd. Daarom werd het Vlaams Grondwatermodel voornamelijk gebruikt voor de totale diktebepaling van het Quartair dat werd afgebakend op basis van de Quartairkaart. Het 3D-model bevat dan de Quartaire, Tertiaire, Mesozoïsche en Paleozoïsche formaties volgens de codering van het Vlaams Grondwatermodel tot op 30 m diepte. Het resultaat is dat voor elk rasterpunt (100 x 100 m) in Vlaanderen geweten is wat de dikte, basisdiepte en lithologie is van de verschillende lagen van het Vlaams Grondwatermodel. Deze informatie is een noodzakelijke tussenstap naar een grondtypenmodel en -kaart en verschaft ook de informatie nodig om van site-specifieke parameters de schaalvergroting naar het grondtypenmodel van Vlaanderen te maken.

In de tweede fase wordt een lithotypenkaart opgemaakt voor het Quartair dat in de eerste fase nog als één enkele eenheid werd beschouwd. Dit is een complexe stap omdat de bestaande Quartairgeologische kaarten uitgaan van genetische karakteristieken (gebaseerd op ontstaansmilieu zoals fluvia-tiele, eolische, getijden- of hellingsafzettingen, en niet op lithologie), en geen diktes aan de verschillende lithologische eenheden koppelen. De lithotypenkaart van het Quartair moet anderzijds voldoende gedetailleerd zijn om 'slappe gronden' (met veen en slappe klei) te kunnen onderscheiden. Hierbij worden de 42 profieltypen van het Quartair eerst veralgemeend (ingevolge de schaal-aanpassing van 1:50.000 tot 1:250.000), vervolgens gekoppeld aan de diktekaart van de Quartaire afzettingen, waarna werd nagegaan welke pakketten onder dit Quartair aanwezig zijn om de profieltypen verder aan te vullen tot een diepte van 30 m. Op basis van deze gegevens werden 8 typesequenties of lithotypes gedefinieerd die representatief zijn voor het Vlaams grondgebied. De resulterende kaart is een lithotypenkaart van Vlaanderen (Figuur 7).



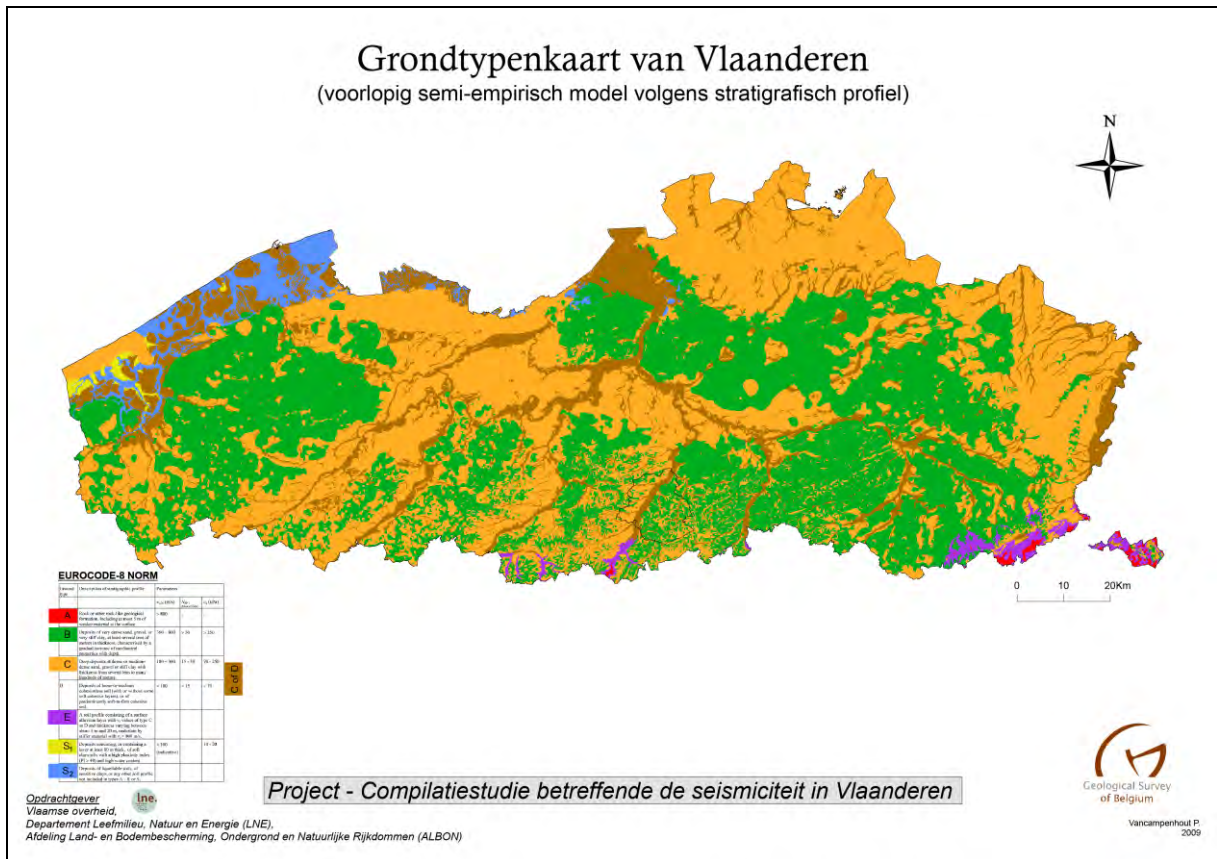
Figuur 7 - Lithotypenkaart van Vlaanderen

In de derde fase wordt aan de hand van de data uit de voorgaande fasen een grondtypenkaart volgens Eurocode 8 opgesteld. Zoals eerder aangehaald ontbreken voorlopig de gegevens om dit op een correcte gebiedsoverdekkende manier te doen. We hebben daarom een omzetting uitgevoerd via twee alternatieve benaderingen, met verschillend resultaat.

In een eerste (semi-empirische) benadering zijn we uitgegaan van de beschrijving van het stratigrafisch profiel die in Eurocode 8 wordt gegeven bij de verschillende grondtypes. We gaan er hierbij van uit dat de classificatie van grondtypes op basis van gemiddelde schuifgolfsnelheid niet willekeurig bepaald is, maar werd gekozen in functie van effectief voorkomende en goed herkenbare bodemlagen, vooral deze die in bekende aardbevingsgevoelige zones tot verschillende risico's kunnen leiden. In Vlaanderen zijn er voldoende geologische boorbeschrijvingen voorhanden om op deze manier tot een gebiedsoverdekkende cartografie te komen.

In de semi-empirische benaderingswijze werd ieder grondtype A - E, met inbegrip van de speciale grondtypes S_1 en S_2 , vergeleken met een welbepaald stratigrafisch profiel en dan in kaart gebracht, mits welbepaalde doch logische dikte-aannames. Hierbij stellen zich toch wel enkele conceptuele problemen. Zo lijkt de stratigrafische beschrijving van grondtype C erop te wijzen dat dit gedefinieerd is in actieve zakkingsgebieden. Volgens deze interpretatie zou het als genetisch bepaald type in Vlaanderen niet voorkomen, terwijl de V_5 -waarden anderzijds aangeven dat het gewoon een overgangstype is tussen grondtype B en grondtype D. Vanuit deze invalshoek werden dikke en/of zandige pakketten Pleistocene lagen tot grondtype C toegewezen, waardoor dit grondtype toch in grote delen van Vlaanderen voorkomt. Speciaal grondtype S_1 werd geïnterpreteerd als slappe Holoocene sedimenten dat door minimale diktevereiste beperkt blijft tot de westelijke Kustvlakte. Speciaal

grondtype S₂ werd gedefinieerd als ondergecompacteerd en waterverzadigd zand, onafhankelijk van de parameters opgelegd in Eurocode 8 maar wel gebaseerd op het optreden van liquefactiefenomenen die niet gerelateerd zijn aan seismische bronnen (bijvoorbeeld bij differentiële belasting). Dit grondtype is waargenomen in jonge getijdengeulen, voornamelijk in de oostelijke Kustvlakte. Het resultaat is een grondtypenkaart van Vlaanderen volgens stratigrafisch profiel (Figuur 8).

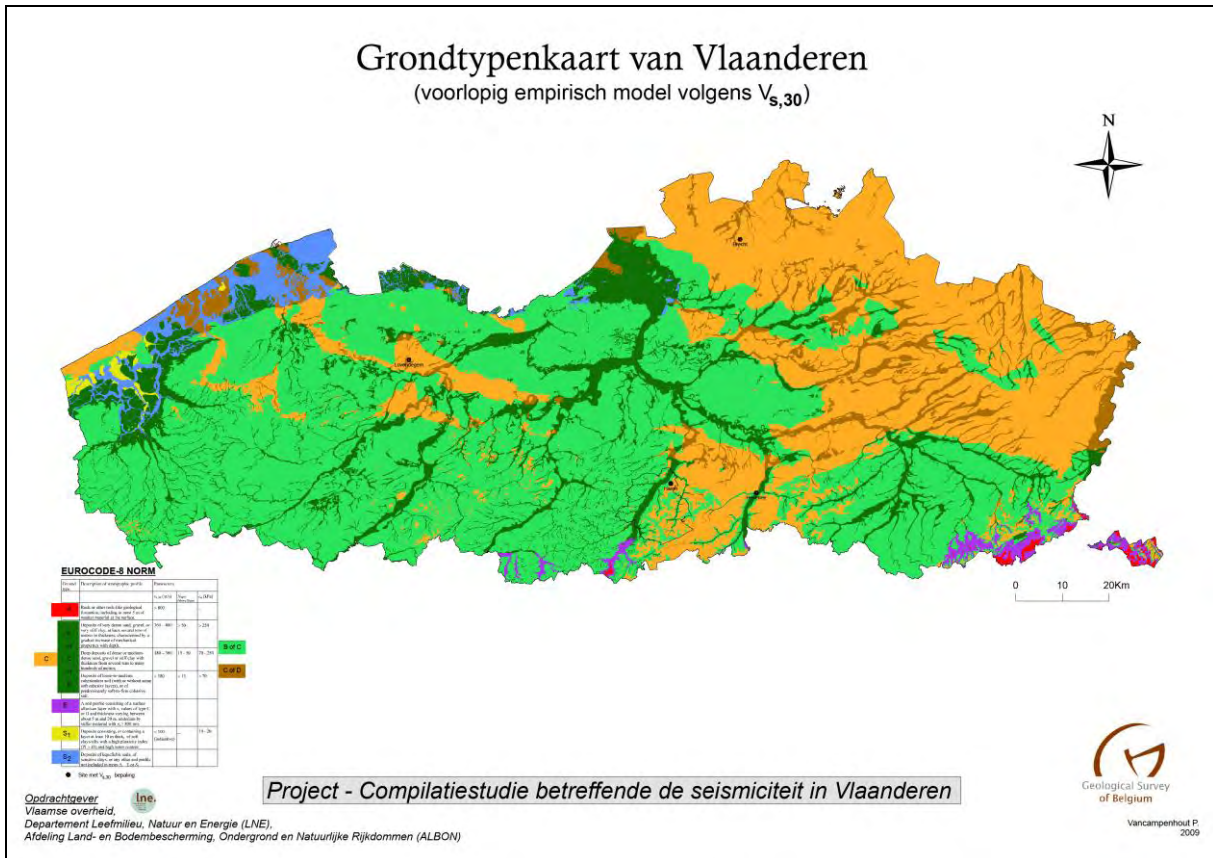


Figuur 8 - Voorlopige grondtypenkaart van Vlaanderen (semi-empirisch model op basis van informatieve beschrijving van het stratigrafisch profiel van de grondtypes in Eurocode 8)

Mogelijk foute interpretaties kunnen optreden voor lithologieën met afwijkende V_s -waarden, bijvoorbeeld verlaging van V_s in de verweerde top van grofkorrelige zanden (die dan een metersdik interval beïnvloedt, terwijl dit in fijnere sedimenten over een verwaarloosbare dikte gebeurt), of dikke grondpakketten die juist tot een verhoging van V_s kunnen leiden in verhouding tot hun normale waarde.

In een tweede (empirische) benadering worden de lithotypenkaart en het 3D-model tot op 30 m gekoppeld met de schuifgolfsnelheden bekomen in deel 1 van WP1 (§ 4.5.1). Er is doorgaans een duidelijke relatie tussen beide, gebaseerd op lithologische samenstelling en compactiegeschiedenis. Er zijn voldoende aanwijzingen uit standaard-penetratietesten, boorgatmetingen, reflectieseismische profielen en ervaring in het lithologisch beschrijven van gesteentemonsters om aan te nemen dat verschillende afzettingen uit eenzelfde fase van de geologische geschiedenis onderling slechts beperkte variatie vertonen en slechts een lichte toename in compactie met toenemende diepte vertonen, in vergelijking met de duidelijke sprongen die optreden tussen de verschillende fasen in de geologische geschiedenis. Het lijkt dus logisch om een omzetting uit te voeren op basis van correlatie van de stratigrafische sequenties met representatieve schuifgolfsnelheden en omzetting naar ge-

middelste waarden over het 30 meter interval. Hiermee verkrijgt men een beeld dat afwijkt van de stratigrafische grondtypenkaart. Zo is het mogelijk vanuit totaal verschillende lithotypes tot eenzelfde gemiddelde schuifgolfsnelheid over het 30-meter interval te komen (bijvoorbeeld slap veen op harde rots vs. een lemig-zandige sequentie). Met name lithotypes die slap Holoceen bevatten ($V_S < 100$ m/s), eventueel in combinatie met iets vaster Pleistoceen, en steeds in combinatie met een vastere Tertiaire onderlaag kunnen naargelang de dikteverhoudingen tot grondtype B, C of D behoren. Grondtypes A, E, S_1 en S_2 werden empirisch niet vastgesteld en dus overgenomen van de semi-empirische kaart. Het resultaat is de kaart in Figuur 9.



Figuur 9 - Voorlopige grondtypenkaart van Vlaanderen (empirisch model op basis van beschikbare $V_{s,30}$ -metingen)

De onzekerheden over de aan te nemen schuifgolfsnelheden zijn voornamelijk echter te groot om een eenduidige empirische grondtypenkaart volgens $V_{s,30}$ uit te geven. We leggen er de nadruk op dat beide grondtypenkaarten niet als een definitief resultaat mogen worden beschouwd, maar als mogelijke modellen van de werkelijkheid. De twee modellen vertonen vooral verschillen in het relatieve voorkomen van grondtypes B en C. Zo is bv. uit geofysische proeven op twee verschillende sites gebleken dat de Zanden van Brussel een schuifgolfsnelheid hebben die eerder aansluit bij het Pleistoceen dan bij het Tertiair. Dit is mogelijk een gevolg van de losse korrelstapeling in snel opgevulde geulen of door ontkalking. De semi-empirische kaart levert weliswaar een stabiele cartografie op, maar ze is gebaseerd op een stratigrafische beschrijving die louter informatief is. De empirische kaart is gebaseerd op een correlatie tussen de lithotypenkaart en $V_{s,30}$ -metingen. Dit is de aanbevolen manier in Eurocode 8, maar omdat het aantal gegevens beperkt is zal iedere nieuwe meting mogelijk tot een ander karteerresultaat leiden. Daarom moeten beide kaarten als informatief beschouwd worden, en is het nodig om meer testen uit te voeren om het grondtype te bepalen.

4.6. Classificatie en cartografie van liquefactiegevoelige zones (WP2)

De cartografie van liquefactiegevoelige zones omhelst de cartografie van de speciale grondtypes S1 en S2 in de classificatie volgens Eurocode 8. Deze cartografie werd uitgevoerd samen met de andere grondtypes in deel 2 van werkpakket 1 (zie § 4.5.2).

Voor de kwantitatieve bepaling van grondtype S₂ (liqueficeerbare laag bij seismische belasting) werd binnen dit werkpakket vooreerst een grondige literatuuranalyse uitgevoerd hoe de liquefactie- of vervloeiingsgevoeligheid op een kwalitatieve en/of kwantitatieve manier kan worden geëvalueerd. Dit heeft geleid tot het state-of-the-art rapport “Dynamic Soil Behaviour and Liquefaction Assessment” (Karg and Haegeman, Juni 2008).

In dit document wordt na een korte inleiding over de dynamische grondkarakteristieken, nodig voor een verder begrip van het rapport, een beschrijving gegeven van het vervloeiingsfenomeen, een overzicht geformuleerd van de methodes ter bepaling van het vervloeiingsrisico om te eindigen met een korte beschrijving van de effecten van een vervloeiing. Bovenvermelde methodes kunnen grofweg worden ingedeeld in drie categorieën: een bepaling van de vervloeiingsgevoeligheid op basis van een cyclische schuifspanningsanalyse, een cyclische vervormingsanalyse of op basis van de korrelverdeling van het materiaal. De cyclische schuifspanningsanalyse is internationaal het meest gangbaar waarbij de weerstand van het grondmateriaal tegen vervloeiing kan worden bepaald uit labo- of terreinproeven. De meest gangbare terreinproef hierbij is de SPT (Standard Penetration Test) maar ook de seismische proeven en de klassieke sondering kunnen hiervoor worden gebruikt. Gezien in Vlaanderen weinig SPT-metingen of $V_{s,30}$ -metingen ter beschikking zijn, wordt voor de kwantitatieve berekening van de vervloeiingsgevoeligheid dan ook de nadruk gelegd op methodes die gebruik maken van de conusweerstand afkomstig uit sonderingen.

Eén van laatstgenoemde methodes, de methode van Robertson en Wride (1998) zoals geformuleerd in het state-of-the-art rapport, werd in een volgende stap geprogrammeerd in een Excel-document. Er werden meerdere kwantitatieve berekeningen uitgevoerd van het liquefactierisico voor verschillende regio's in Vlaanderen volgens de bepalingen in Eurocode 8, en ook voor grondversnellingen geassocieerd met de aardbevingen van Roermond en Verviers. Daartoe werden in de Databank Ondergrond Vlaanderen representatieve sonderingen en boringen voor een regio opgezocht met grote aandacht voor quasi zuivere zandlagen met lage conusweerstand op geringe diepte.

Aan de hand van het state-of-the-art rapport en het bijhorende rekenblad kan voor andere magnitudes en versnellingen alsook eigen gekozen regio's het liquefactierisico berekend worden.

4.7. Site-amplificatie en seismische microzonering (WP4)

Site-amplificatie is een belangrijk probleem bij het ontwerp van aardbevingsbestendige structuren op plaatsen waar de bovenste grondlagen bijzonder zacht zijn. In zulke gevallen kunnen de seismische trillingsniveaus veel hoger worden door resonantie van de zachte lagen.

Volgens Eurocode 8 moet het effect van site-amplificatie in rekening gebracht worden in twee gevallen: (1) bij het ontwerp van belangrijke constructies en (2) voor gronden van type S₁, d.w.z. gronden met een lage schuifgolfsnelheid.

Afhankelijk van de geometrie van de site, dienen ééndimensionale, tweedimensionale, of driedimensionale modellen gebruikt te worden voor de berekening van site-amplificatie. Ééndimensionale modellen worden gebruikt voor horizontaal gelaagde gronden, tweedimensionale modellen voor langgerekte valleien en driedimensionale modellen voor sites met een complexere geometrie. Binnen dit werkpakket wordt een ééndimensionaal model gebruikt.

Er wordt verondersteld dat het invallende golfveld enkel bestaat uit een verticale schuifgolf. Dit is een courante aanname bij de modellering van site-amplificatie.

Hoewel grond vaak gemodelleerd wordt als een lineair (visco-)elastisch materiaal, is het constitutief gedrag van grond in werkelijkheid niet-lineair: de glijdingsmodulus van grond neemt af met toenemende vervorming. Daarnaast leidt toenemende vervorming ook tot een sterker hysteresiseffect in de spannings-vervormingsrelatie, en dus tot meer energiedissipatie.

Bij de berekening van site-amplificatie kan het constitutieve gedrag van grond op drie manieren gemodelleerd worden: (1) de spannings-vervormingsrelatie wordt gelineariseerd, zodat het mogelijk wordt een lineair materiaalmodel te gebruiken, (2) er wordt gebruik gemaakt van een equivalent lineair model, waarbij de eigenschappen van de grondlagen iteratief aangepast worden in functie van het effectieve vervormingsniveau, en (3) er wordt een volledige niet-lineaire berekening uitgevoerd, gebaseerd op directe tijdsintegratie. In regio's met een beperkte seismiciteit, zoals Vlaanderen, kan verwacht worden dat het belang van het niet-lineaire gedrag van de grond beperkt is en dat een lineaire of equivalent lineaire aanpak gevolgd kan worden. De volledig niet-lineaire aanpak komt daarom niet aan bod in dit werkpakket.

In de equivalente lineaire aanpak worden de equivalente grondkarakteristieken gewoonlijk frequentie-onafhankelijk verondersteld (dit is het geval in commerciële software zoals SHAKE2000 en ProShake). Deze veronderstelling leidt echter vaak tot een onderschatting van de respons bij hogere frequenties. Een alternatieve methode, gebaseerd op het gebruik van frequentie-afhankelijke equivalente grondkarakteristieken, is daarom recent ontwikkeld aan MIT (Kausel & Assimaki, 2002).

In het kader van WP4 is een richtlijn uitgewerkt voor de berekening van site-amplificatie volgens Eurocode 8. De lineaire en de equivalente lineaire aanpak zijn uitgewerkt. Zowel het gebruik van frequentie-onafhankelijke als het gebruik van frequentie-afhankelijke equivalente grondkarakteristieken wordt toegelicht. De berekening gebeurt met de ElastoDynamics Toolbox (EDT) voor MATLAB, ontwikkeld aan de afdeling Bouwmechanica van de K.U.Leuven (Schevenels et al., 2009).

De richtlijn is uitgewerkt aan de hand van een voorbeeld, waarbij het effect van site-amplificatie geanalyseerd wordt voor een site met een grondprofiel dat typisch is voor Vlaanderen. De seismische belasting bestaat uit een accelerogram van de Kocaeli-aardbeving (Turkije, 1999) dat herschaald is zodat het overeenkomt met het ontwerpresponsspectrum uit Eurocode 8 voor grondtype A (rots). Dit accelerogram geeft de versnelling weer die geregistreerd zou worden in afwezigheid van de zachte toplagen. Vervolgens wordt de versnelling aan de oppervlakte van de zachte lagen berekend en het overeenkomstige responsspectrum. De responsspectra die bekomen worden met (1) de lineaire methode, (2) de frequentie-onafhankelijke equivalente lineaire methode, en (3) de frequentie-afhankelijke equivalente lineaire methode worden vergeleken.

De uitwerking van het voorbeeld toont aan dat EDT effectief bruikbaar is voor de analyse van site-amplificatie. De achterliggende frequentie-afhankelijke equivalente lineaire procedure behoort tot de state of the art van het ogenblik. Daarmee overstijgt EDT de mogelijkheden van andere commerciële pakketten gebaseerd op de equivalente lineaire methode, zoals SHAKE2000 en ProShake.

Met behulp van de uitgewerkte richtlijn is het gebruik van EDT voor de modellering van site-amplificatie een eenvoudige opgave voor mensen die vertrouwd zijn met MATLAB. Voor niet-MATLAB-gebruikers zou de leercurve iets steiler kunnen zijn en is de ontwikkeling van een grafische gebruikersinterface voor EDT allicht aangewezen.

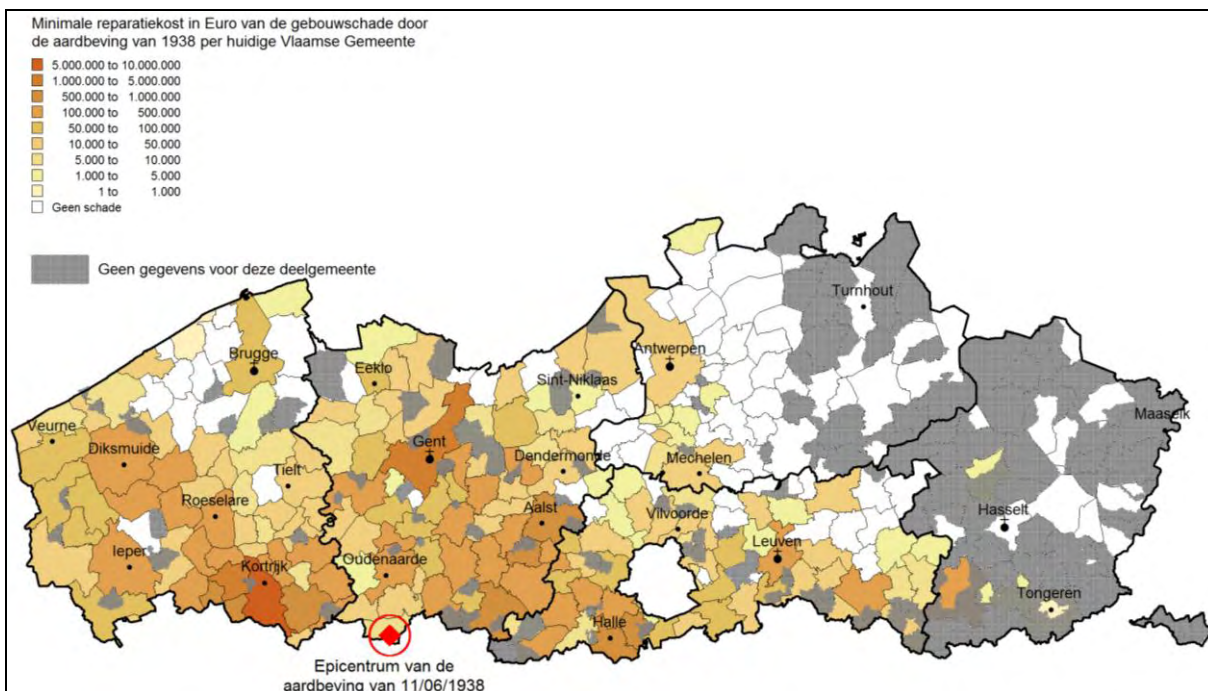
4.8. Evaluatie van de actuele herstellingskost van de materiële schade in Vlaanderen veroorzaakt door de aardbeving van 11 juni 1938 (WP8)

De aardbeving van 11 juni 1938 met magnitude $M_S=5.0$ en epicentrum tussen Oudenaarde en Ronse, veroorzaakte heel wat schade aan gebouwen in een groot deel van België en in Noord-Frankrijk. De Koninklijke Sterrenwacht van België heeft een databank ontwikkeld met alle beschikbare informatie over de schade ten gevolge van deze aardbeving. Deze bevat enerzijds de antwoorden op de officiële macroseismische enquêtes die na de aardbeving naar alle toenmalige gemeentes gestuurd werden met gestandaardiseerde vragen over het aantal vernielde schoorstenen en andere gebouwschade. Anderzijds werd toen via de media ook een oproep gedaan om persoonlijke ervaringen en schade te melden. Die reacties werden samen met toenmalige krantenartikels in de databank ingevoerd.

De gemelde schade werd opgedeeld in tien verschillende schadecategorieën, namelijk: barsten of instorten van een schoorsteen; instorting van een dak; val van dakpannen; val van bakstenen; instorting van een plafond; barsten van een muur; instorting van een muur; gebroken venster; instorting veranda/serre, en andere schade. Per toenmalige Vlaamse gemeente werd vervolgens het aantal gemelde gevallen per schadecategorie geteld. Op basis van het borderel van eenheidsprijzen van Architecten- & Ingenieursbureau Aspen werd begroot wat voor elke schadecategorie de huidige kostprijs (in Euro) per eenheid zou zijn om deze schade te herstellen volgens de huidige bouwvoorschriften. De andere schade werd niet mee in rekening gebracht, tenzij de toenmalige reparatiekost in Belgische frank vermeld werd; in dat geval kon dit bedrag volgens de Abex-index omgerekend worden naar Euro. Zo werd de kost per toenmalige gemeente berekend. Deze werd vervolgens omgerekend naar de kost per huidige gemeente na fusie (Figuur 10).

Het totale berekende bedrag voor Vlaanderen bedraagt ongeveer 26 miljoen Euro. De zwaarst getroffen provincies waren West-Vlaanderen (13 miljoen Euro) en Oost-Vlaanderen (8 miljoen Euro). Gezien het epicentrum in het zuiden van Oost-Vlaanderen gelegen was, is de relatief grotere schade in West-Vlaanderen op het eerste zicht verrassend. De verklaring hiervoor kan gevonden worden in de ligging van de grotere steden ten opzichte van het epicentrum. De zwaarst getroffen steden waren Kortrijk (6.6 miljoen Euro) en Gent (2.7 miljoen Euro). De aardbeving van 1938 veroorzaakte daarnaast ook schade in Wallonië (ongeveer 11 miljoen Euro, vooral Henegouwen en Waals-Brabant), in Brussel (ongeveer 2 miljoen Euro) en in Noord-Frankrijk. We leggen er de nadruk op dat deze cijfers enkel gebouwschade betreffen, en dus geen rekening houden met economische schade of menselijke tol (er vielen ook minstens 2 doden en verschillende gewonden). Het gaat hierbij enkel om de herstellingskost van de materiële schade die ons bekend is en die paste in de schadecatego-

rieën, aan de huidige tarieven en volgens de huidige bouwvoorschriften. Deze cijfers kunnen gezien worden als de minimale kost voor het herstellen van de gebouwschade indien dezelfde aardbeving zich anno 2009 zou herhalen.



Figuur 10 – Geëvalueerde minimale huidige reparatiekost voor de gebouwschade veroorzaakt door de aardbeving van 1938 per huidige Vlaamse gemeente

Voor een beter beeld dienen we echter ook rekening te houden met de groei sinds die tijd. Afhankelijk van de gebruikte groeifactor (toename bebouwde oppervlakte, toename bruto regionaal product) zou dit de minimale schade in Vlaanderen ongeveer tussen 53 en 236 miljoen Euro brengen. Deze cijfers liggen hoger dan de schadekost bij de aardbeving van Luik in 1983 (42 miljoen Euro uitbetaald door het Rampenfonds), en in dezelfde grootteorde als de schadekost in Nederland en Duitsland bij de aardbeving van Roermond in 1992 (125 miljoen Euro, waarvan 103 miljoen Euro gebouwschade, geschat door herverzekeringsmaatschappij). Anderzijds ligt de berekende schade per woning (ongeveer 2093 Euro per woning) lager dan wat in 1983 uitbetaald werd door het Rampenfonds (3230 Euro per woning), maar dit verschil is te verklaren door de concentratie van relatief zware schade in een klein gebied (10 km rond het epicentrum) bij de aardbeving van 1983, tegenover de grote verspreiding van matige tot zware schade bij de aardbeving van 1938. Dit geeft aan dat de berekende schadekost vrij realistisch is.

5. Aanbevelingen voor verder onderzoek

Dit rapport is een neerslag van de huidige staat van de kennis over seismiciteit en seismische gevarenkans in Vlaanderen. Dit mag echter geenszins als een eindpunt beschouwd worden. Deze studie heeft ook aangetoond dat er op verschillende vlakken nog veel onzekerheden blijven die verder onderzocht moeten worden. Hieronder formuleren we een aantal aanbevelingen voor verder onderzoek die naar onze mening prioritaire aandacht verdienen.

Ten eerste is een aardbevingscatalogus nooit af. Regelmatig worden we geconfronteerd met het feit dat onze kennis over de seismische activiteit onvolledig is: aardbevingen op plaatsen waar voorheen geen aardbevingen waren gekend, aardbevingen die veel zwaarder zijn of ergere gevolgen hebben dan we hadden verwacht, enz. De aardbevingscatalogus moet daarom op een continue basis bijgewerkt worden. Het verdient daarom aanbeveling om het seismometernetwerk verder uit te bouwen. Omdat in Vlaanderen de harde sokkel bijna overal bedekt wordt door losse sedimentlagen zijn hiervoor bijkomende boringen nodig. Ook moet er verder gezocht worden naar historische teksten over de gevolgen van aardbevingen in het verleden, op basis waarvan de bronparameters van deze aardbevingen beter bepaald kunnen worden. Tenslotte is ook paleoseismologisch onderzoek noodzakelijk. Tot nog toe is dit slechts gebeurd voor een paar breuken in de Roerdalslenk. In de andere seismotektonische zones is weinig bekend over actieve breuken. Zo is het nog steeds gissen welke breuken verantwoordelijk zijn voor de aardbeving van 1938 tussen Oudenaarde en Ronse en voor de grootste aardbeving in de gekende geschiedenis, de aardbeving van 1692 in de omgeving van Verviers.

Ten tweede is gebleken dat er in Vlaanderen onvoldoende gegevens zijn over de schuifgolfsnelheid in de oppervlakkige sedimentlagen, nodig om een betrouwbare grondtypenkaart te maken voor Vlaanderen volgens de classificatie in Eurocode 8. Er is nood aan een uitgebreide meetcampagne om op verschillende plaatsen in Vlaanderen de $V_{s,30}$ te bepalen. Daarnaast dient ook de correlatie tussen $V_{s,30}$ en andere geotechnische parameters, zoals de CPT-gegevens van de Databank Ondergrond Vlaanderen, onderzocht te worden, zodat deze gegevens mee gebruikt kunnen worden om het grondtype te bepalen. De lithotypenkaart die in het kader van dit project werd opgesteld, vormt hierbij een zeer nuttig instrument, zowel als leidraad bij de planning van de metingen van de schuifgolfsnelheid, als bij het aanmaken van een verbeterde grondtypenkaart op basis van de nieuwe gegevens.

Ten derde is verder onderzoek nodig naar de liquefactiegevoeligheid van bodems. De definitie van grondtype S_2 in Eurocode 8 blijkt niet eenduidig te zijn (de dikte is onder meer niet bepaald), wat het uiteraard moeilijk maakt een correcte cartografie uit te voeren. In dit project werd een methode ontwikkeld waarmee de liquefactiegevoeligheid op een kwantitatieve manier bepaald kan worden op basis van CPT-gegevens. Gezien de relatief grote beschikbaarheid van dit soort gegevens in Vlaanderen, is het logisch om deze methode op grote schaal toe te passen. Een andere mogelijkheid is om, wanneer een verbeterde grondtypenkaart kan worden opgesteld, deze te koppelen aan de referentie-piekgrondversnelling in de Belgische nationale bijlage bij Eurocode 8, om kaarten op te stellen van de gebieden waar volgens de bepalingen in Eurocode 8 onder bepaalde voorwaarden wel of geen rekening gehouden moet worden met liquefactiegevaar.

Ten vierde verdient het aanbeveling om onderzoek uit te voeren naar responspectra die rekening houden met de diepe geologie. De standaard-responspectra in Eurocode 8 zijn enkel gebaseerd op de samenstelling van de geologische lagen nabij het oppervlak (bovenste 30 m). Ook de totale dikte van de losse sedimentlagen speelt echter een rol. Hoe dikker de losse sedimentlagen, hoe meer het elastisch responspectrum naar lagere frequenties opschuift. Dit is vooral van belang voor het ontwerp van grote gebouwen, die een lagere eigenfrequentie hebben. Onderzoek door Nguyen et al. (2004) toonde bv. aan dat het gebied met de meeste schade bij de aardbeving van 1938 vermoedelijk gecontroleerd werd door de dikte van de sedimentlagen bovenop het Brabantmassief. Gezien de aanwezigheid in Vlaanderen van relatief dikke lagen los sediment, die in dikte toenemen naar het noorden toe, is het nuttig om aangepaste responspectra te bepalen. De methode die werd uitgewerkt in WP4 van dit project kan hiervoor toegepast worden, in combinatie met geologische gegevens.

Ten vijfde is het voor kleine gebieden met veel belangrijke gebouwen (vb. havengebied) zinvol een seismische microzonerings uit te voeren, d.w.z. het effect van de lokale geologie op het seismische gevaar in kaart te brengen. Hiertoe moeten geofysische proeven uitgevoerd worden ter bepaling van de schuifgolfsnelheid van de grond op een groot aantal locaties in het in kaart te brengen gebied. Vervolgens moet voor iedere locatie een site-amplificatie-analyse gebeuren. Dit kan op basis van de methodologie uitgewerkt in WP4.

Ten zesde is een meer doorgedreven probabilistische analyse van de seismische gevarenkans wenselijk. We hebben in dit rapport enkel verschillende bronzoneringsmodellen beschouwd. Het is echter onmogelijk om met de huidige kennis één definitief bronzoneringsmodel op te stellen. Elk model is in zekere mate subjectief. Dit geldt ook voor andere parameters, zoals de berekening van de frequentie-magnituderelatie voor elke zone, de geëvalueerde maximale magnitudes en brondieptes, de keuze van de dempingswet, de onzekerheid op de magnitudes in de aardbevingscatalogus en eventuele conversies tussen magnitudeschalen, de veronderstellingen over de volledigheid van de catalogus, enz. In uitgebreide probabilistische analyses van de seismische gevarenkans wordt meestal gewerkt met een zgn. logische boomstructuur (logic tree), met een vertakking voor elke stap waar verschillende modellen voor bestaan, zoals bv. bronzoneringsmodel, maar ook dempingswet, maximale magnitude, a- en b-waarden van de frequentie-magnituderelatie, enz. De berekening wordt dan uitgevoerd voor alle uiteinden van de logische boomstructuur, en tenslotte worden dan de mediaanwaarde en eventueel hogere betrouwbaarheidsintervallen berekend. Op deze manier kan ook de invloed nagegaan worden van de onzekerheden van deze verschillende parameters op de berekening van de seismische gevarenkans.

Tenslotte kan er gedacht worden aan een uitbreiding van de risico-analyse naar werkelijk seismisch risico. Dit vereist een inventarisatie van de blootstelling (bevolkingsdichtheid, aantal gebouwen, nuts- en leeflijnen, infrastructuur, industrie, kritische faciliteiten, ...) en de kwetsbaarheid ervan. Indien we over deze gegevens zouden beschikken, is het niet ondenkbaar dat we in de toekomst, wanneer er een potentieel destructieve aardbeving gebeurt, een snelle evaluatie kunnen uitvoeren van de mogelijke schade. Hiervoor is een snelle bepaling van de bronparameters van de aardbeving nodig (bv. op basis van een automatisch detectiesysteem) en modellering van de grondbewegingen die erdoor worden veroorzaakt, waarbij o.a. een betrouwbare grondtypenkaart een belangrijke rol zou kunnen spelen om rekening te houden met het site-effect.

6. Structuur van het uitgebreide rapport

- Hoofdstuk 1: Bepalingen over de seismische belasting in Eurocode 8.
- Hoofdstuk 2: Aardbevingscatalogus voor Vlaanderen en omgeving (KSB).
- Hoofdstuk 3: Beschrijving van de belangrijkste aardbevingen die een impact hadden in Vlaanderen (KSB).
- Hoofdstuk 4: Seismotektonische zonerings van Vlaanderen en omgeving (KSB).
- Hoofdstuk 5: Kaart van de seismische gevarenkans op het niveau van de harde sokkel (samenwerking KSB en K.U.Leuven).
- Hoofdstuk 6: Voorbereidende studie voor de classificatie en cartografie van grondtypes in Vlaanderen volgens Eurocode 8.
 - Deel 1: Geofysische proeven ter bepaling van $V_{s,30}$ in Vlaanderen (K.U.Leuven, in het Engels).
 - Deel 2: Voorbereidende cartografie van grondtypes in Vlaanderen volgens Eurocode 8 (BGD).
- Hoofdstuk 7: Classificatie en cartografie van liquefactiegevoelige zones (UGent, met een bijdrage van BGD).
- Hoofdstuk 8: Een praktische richtlijn voor de bepaling van site-amplificatie (K.U.Leuven, in het Engels).
- Hoofdstuk 9: Evaluatie van de actuele herstellingskost van de materiële schade in Vlaanderen veroorzaakt door de aardbeving van 11 juni 1938 (KSB, in samenwerking met Faculté Polytechnique de Mons).

7. Referenties

EN 1998-1:2004 – Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part1: General rules, seismic actions and rules for buildings (December 2004).

NBN-ENV 1998-1-1: 2002 NAD-E/N/F – Eurocode 8 : Ontwerp en dimensionering van aardstokbestendige structuren – Deel 1-1 : Algemene regels – Aardstokken en algemene voorschriften voor structuren – Belgische toepassingsrichtlijn (April 2002).

Alexandre, P., Kusman, D., Petermans, T., and Camelbeeck T. (2008), The 18 September 1692 earthquake in the Belgian Ardenne and its aftershocks. In: Modern Approaches in Solid Earth Sciences - Historical Seismology: interdisciplinary studies of past and recent earthquakes, 209-230.

Ambraseys, N. N. (1995), The prediction of earthquake peak ground acceleration in Europe, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 24, 467-490.

Kausel, E., and Assimaki, D. (2002), Seismic simulation of inelastic soils via frequency-dependent moduli and damping. ASCE Journal of Engineering Mechanics, 128(1):34-47, 2002.

Leynaud, D., Jongmans, D., Teerlynck, H., and Camelbeeck, T. (2000), Seismic hazard assessment in Belgium, Geologica Belgica, 3(1-2), 67-86.

Nguyen, F., Van Rompaey, G., Teerlynck, H., Van Camp, M., Jongmans, D., and Camelbeeck, T. (2004), Use of microtremor measurement for assessing site effects in Northern Belgium - Interpretation of the observed intensity during the MS = 5.0 June 11 1938 earthquake, Journal of Seismology, v. 8, p. 41-56.

Robertson, P. K., and Wride, C. E. (1998), Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. Canadian Geotechnical Journal. 35(3), 442-459.

Schevenels, M., François, S., and Degrande, G. (2009, accepted for publication), EDT: An ElastoDynamics Toolbox for MATLAB. Computers & Geosciences.