

## GEOHEAT App - Activiteit 2: Eerste inschatting van geothermisch potentieel van breuken en breukzones.



**TNO** innovation  
for life



Studie uitgevoerd in opdracht van:

Januari 2014



**VITO NV**

Boeretang 200 - 2400 MOL - BELGIE  
Tel. + 32 14 33 55 11 - Fax + 32 14 33 55 99  
vito@vito.be - www.vito.be

BTW BE-0244.195.916 RPR (Turnhout)  
Bank 375-1117354-90 ING  
BE34 3751 1173 5490 - BBRUBEBB

Alle rechten, waaronder het auteursrecht, op de informatie vermeld in dit document berusten bij de Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek NV ("VITO"), Boeretang 200, BE-2400 Mol, RPR Turnhout BTW BE 0244.195.916. De informatie zoals verstrekt in dit document is vertrouwelijke informatie van VITO. Zonder de voorafgaande schriftelijke toestemming van VITO mag dit document niet worden gereproduceerd of verspreid worden noch geheel of gedeeltelijk gebruikt worden voor het instellen van claims, voor het voeren van gerechtelijke procedures, voor reclame of antireclame en ten behoeve van werving in meer algemene zin aangewend worden

---

## SAMENVATTING

Deze studie wordt uitgevoerd in het kader van het grensoverschrijdende Interregproject “GEOHEAT APP”, waar VITO, Grontmij en TNO de haalbaarheid van diepe geothermie wensen na te gaan in de grensregio Vlaanderen-Nederland.

In deze studie zijn breukenkaarten gecorreleerd over de Nederlands-Vlaamse grens. De breuken zijn geëvalueerd op hun potentieel om vloeistofstromingen te focussen volgens de lithologie en de aanwezige breuken en recente breukactiviteiten.

De kans dat het geothermisch potentieel langs breuken in de Krijtkalk en de Kolenkalk Groepen is toegenomen is het grootst in de Roerdalslenk. De onderzoekslocaties van Eindhoven, Agropolis, Kessenich en Maastricht liggen in deze regio. Er is verder tevens een mogelijkheid dat het geothermisch potentieel langs breuken is toegenomen in Turnhout. De kleinste kans dat het geothermische potentieel langs breuken is toegenomen, is in het westen van de provincie Antwerpen waar zich onder andere de Antwerpse studielocatie bevindt.

## INHOUD

Samenvatting	I
Inhoud	II
Lijst van figuren	III
<b>HOOFDSTUK 1. Inleiding</b>	<b>1</b>
<b>HOOFDSTUK 2. Methodologie</b>	<b>2</b>
2.1. Lithologie	2
2.2. Breuken	2
2.3. Breukactiviteit en breuken georiënteerd naar het spanningsveld	4
2.3.1. Gekarteerde seismisch actieve gebieden	4
2.3.2. Historische aardbevingsdata	5
2.3.3. Breuken die door Quartaire lagen snijden	6
<b>HOOFDSTUK 3. Resultaten</b>	<b>9</b>
<b>HOOFDSTUK 4. Besluit</b>	<b>10</b>
Referenties	11
Bijlage 1	12

---

**LIJST VAN FIGUREN**

- Figuur 1: Breuken zijn over de grens gecorreleerd voor de Krijtkalk Groep (links) en de Kolenkalk Groep (rechts). Vooral in de gebieden binnen de rode rechthoeken was het nodig de locaties van de breuken aan te passen om ze op elkaar te laten aansluiten. \_\_\_\_\_ 3
- Figuur 2: Gebieden in het grijs zijn niet meegenomen in de analyse van het breukpotentieel omdat ze of verder dan 10 km van breukzones afliggen of omdat het stratigrafische interval (Krijtkalk of Kolenkalk) niet aanwezig is. De linker figuur geeft de Krijtkalk Groep aan, de rechterfiguur de Kolenkalk Groep. \_\_\_\_\_ 3
- Figuur 3: Gecombineerde seismische bronnen die seismisch actieve zones in de Roerdalslenk aanduiden. Figuur uit Vanneste et al. (2013). \_\_\_\_\_ 5
- Figuur 4: Locaties van de epicentra van aardbevingen. De grootte van de cirkels is gerelateerd aan de onzekerheid van het epicentrum. Gele cirkels zijn aardbevingen in Nederland en oranje cirkels zijn aardbevingen in Vlaanderen. De rode ellips geeft het gebied aan waar aardbevingen geregistreerd zijn buiten de Roerdalslenk. \_\_\_\_\_ 6
- Figuur 5: Gekarteerde breuken die Quartaire lagen aansnijden. De zwarte cirkels geven gebieden aan die niet als seismisch actief gekarteerd zijn. \_\_\_\_\_ 7
- Figuur 6: Gebieden met een hoger geothermisch potentieel, inclusief gebieden met zowel breuken actief in het Quartair als historisch gerapporteerde aardbevingsepicentra. Links voor de Krijtkalk Groep en rechts voor de Kolenkalk Groep. \_\_\_\_\_ 7
- Figuur 7: Regio's met gemiddeld geothermisch potentieel. Dit zijn gebieden met **of** actieve breuken gedurende het Quartair **of** historisch geregistreerde aardbevingen. Links voor de Krijtkalk Groep en rechts voor de Kolenkalk Groep. \_\_\_\_\_ 8
- Figuur 8: Regio's met weinig geothermisch potentieel, geen bewijs voor recente seismische activiteit. Links voor de Krijtkalk Groep en rechts voor de Kolenkalk Groep. \_\_\_\_\_ 8



## HOOFDSTUK 1. INLEIDING

---

Breuken kunnen in relatie tot vloeistofstroming open of gesloten zijn, maar ook een mengvorm tussen deze beide uitersten kunnen voorkomen. Dit effect is afhankelijk van hun doorlatendheid (of permeabiliteit) in relatie tot de reservoir permeabiliteit. Om deze reden kunnen breuken het geothermisch potentieel van een reservoir zowel verbeteren als verslechteren. In Activiteit 2 wordt een aantal factoren die invloed hebben op het gedrag van breuken en breukzones beoordeeld om te bepalen in hoeverre breuken in staat zijn het geothermisch potentieel van een reservoir te verbeteren. Dit is gedaan voor elk reservoir waarvoor in Activiteit 1 het geologisch potentieel wordt voor bepaald. Factoren die invloed hebben op de werking van breuken zijn gekozen vanuit beschrijvingen in de literatuur en aanwijzingen van het gedrag van breuken.

\*Hierbij moet opgemerkt worden dat, hoewel in Activiteit 2 informatie van recente seismische activiteit gebruikt wordt om het potentieel van breukzones te bepalen dit geen onderzoek is naar het achtergrond-risico op seismische activiteit of het risico op seismische activiteit als gevolg van geothermische activiteiten. \*

## HOOFDSTUK 2. METHODOLOGIE

---

### 2.1. LITHOLOGIE

Of breukzones de permeabiliteit van een reservoir laten toenemen of afnemen hangt af van hun structuur. De structuur van breukzones is afhankelijk van de soort lithologie (soort gesteente) van het reservoir (Bense et al., 2013). De tabel in Bijlage 1 geeft een overzicht van de invloed die processen die optreden tijdens deformatie van reservoirgesteenten in een breukzone hebben op de permeabiliteit van deze gesteenten.

Het is duidelijk dat de activiteit van breuken van verschillende invloeden heeft op de potentiële reservoirs die in Activiteit 1 gekarteerd zijn:

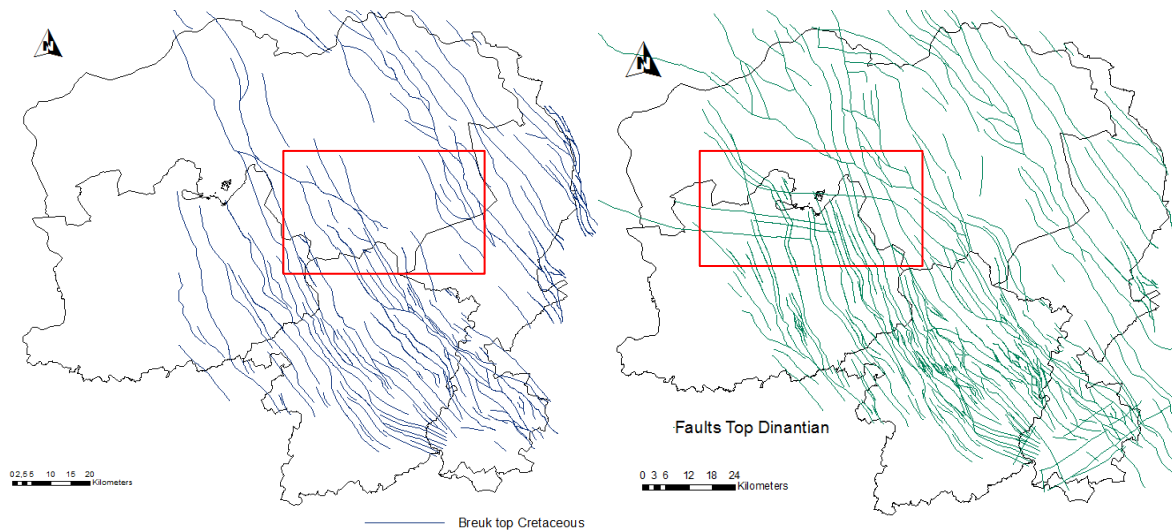
- De Krijtkalk Groep en de Onder-Carboon Kolenkalk Groep zijn carbonaatgesteenten en zullen om die reden breken zodat breccies (is een gesteente opgebouwd uit onregelmatige hoekige brokstukken van ouder gesteente) of spleten worden gevormd. Dit leidt tot een verhoogde permeabiliteit rond de breukzone (Roberts & Stewart, 1994; Billi, 2005). Ook belangrijk is dat deze carbonaatgesteenten kunnen verkarst zijn, waarbij de permeabiliteit nog verder verhoogd is door de oplossing van het gesteente langs de breuken (Roberts & Stewart, 1994). Dit is bijvoorbeeld waargenomen in het geothermische project in Venlo in Nederland (<http://www.square-crops.com/nl/mvo/geothermie>).
- De Onder-Trias zandstenen (Formatie van Buntsandstein) en de Boven-Carboon zandstenen (Formatie van Neeroeteren) zijn klastische sedimenten. In deze gesteenten vermindert de permeabiliteit doorgaans tijdens breukwerking omdat de korrels worden gebroken en het sediment wordt gecompacteerd door een proces dat 'kataklase' (cataclase) wordt genoemd (Gibson, 1998).

Het potentieel van breuken om het geothermische potentieel te verhogen is enkel in aanmerking genomen voor de Krijtkalk Groep en de Onder-Carboon Kolenkalk Groep. Enkel de gebieden waar deze intervallen in de ondergrond aanwezig zijn, worden voor de analyse in aanmerking genomen. De gebieden waarin deze intervallen aanwezig zijn worden gedetermineerd door gebruik te maken van de kaarten die tijdens Activiteit 1 gemaakt zijn.

### 2.2. BREUKEN

Breukenkaarten werden gemaakt door bestaande breukenkaarten van de top van de Krijtafzettingen in Vlaanderen (DOV, 2013) en de top van de Krijtkalk Groep in Nederland (NLOG, 2013) te combineren en kaarten van de top Dinantiaan in Vlaanderen (DOV, 2013) en de Top Carboon in Nederland (NLOG, 2013) te combineren voor de Onder-Carboon Kolenkalk Groep. Breuken die volgens deze bestaande kaarten aan de grens tussen Nederland en Vlaanderen niet op elkaar aansloten zijn op deze kaarten alsnog aangesloten (Figuur 1).

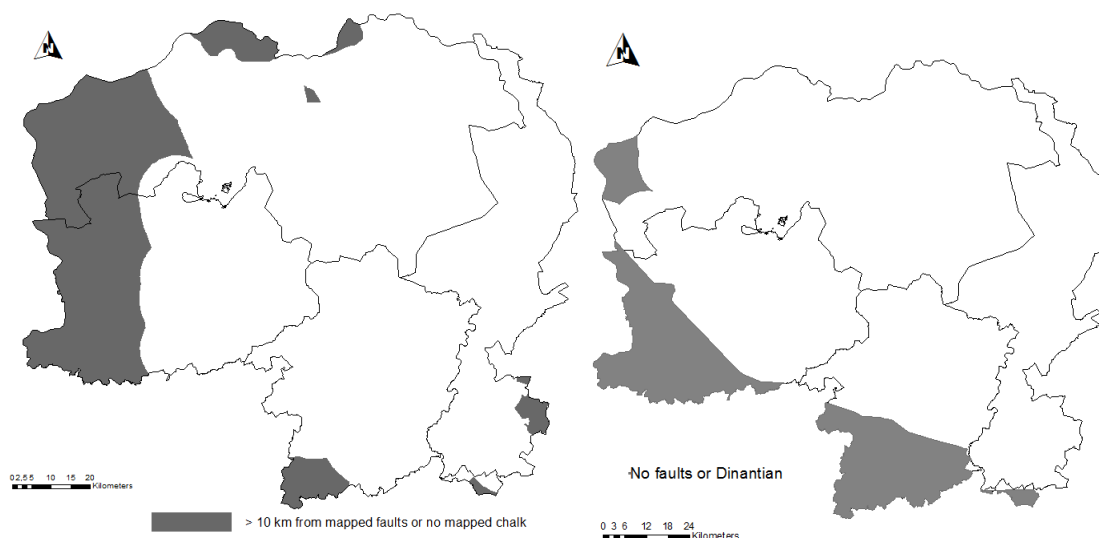




**Figuur 1:** Breuken zijn over de grens gecorreleerd voor de Krijtkalk Groep (links) en de Kolenkalk Groep (rechts). Vooral in de gebieden binnen de rode rechthoeken was het nodig de locaties van de breuken aan te passen om ze op elkaar te laten aansluiten.

Een 10 km brede bufferzone is toegepast op deze breukkaarten om gebieden die verder dan 10 km van de breukzones liggen uit te sluiten. 10 km laat een zone toe die breed genoeg is om relatief zeker te zijn dat verder weg van de bekende breukzones geen andere, kleinere breukzones bestaan.

Het gebied buiten de breukzones is gecombineerd met de gebieden waarin de Krijtkalk Groep en de Kolenkalk Groep niet voorkomen om gebieden te identificeren waar geen additioneel geothermisch potentieel van breukzones voor kan komen (Figuur 2).



**Figuur 2:** Gebieden in het grijs zijn niet meegenomen in de analyse van het breukpotentieel omdat ze of verder dan 10 km van breukzones afliggen of omdat het stratigrafische interval (Krijtkalk of Kolenkalk) niet aanwezig is. De linker figuur geeft de Krijtkalk Groep aan, de rechterfiguur de Kolenkalk Groep.

### 2.3. BREUKACTIVITEIT EN BREUKEN GEORIËNTEERD NAAR HET SPANNINGSVELD

Breuken die ooit een hoge permeabiliteit bezaten kunnen minder permeabel worden als na verloop van tijd deze breuken weer cementeren en als zodanig weer dichtgroeien doordat er mineralen in neerslaan uit circulerende vloeistof (Micarelli et al., 2006). Echter, telkens als de breuk beweegt, of weer wordt geactiveerd, kunnen ze weer geopend worden, waarna het waarschijnlijk is dat de permeabiliteit weer toeneemt (Sibson, 1977). Dit betekent dat breuken die recent actief waren een grotere kans hebben op een verhoogde permeabiliteit dan breuken die reeds lange tijd inactief zijn.

Bovendien hebben Barton et al. (1995) laten zien dat breuken die optimaal georiënteerd zijn in de richting van het spanningsveld een grotere kans hebben dat er beweging optreedt en deze hebben doorgaans ook een hogere permeabiliteit dan breuken die niet in de richting van het spanningsveld georiënteerd zijn. Om een goede beoordeling van de spanning op een breuksysteem te maken is het nodig een groot aantal parameters te kennen, waaronder ook spanningsmetingen. Omdat deze data in het studiegebied veelal ontbreken is het niet mogelijk, binnen de context van dit project, een goede analyse van de breukactiviteiten te maken. Om deze redenen wordt in deze studie de activiteit van breuken gebruikt als een proxy voor de bestaande spanning.

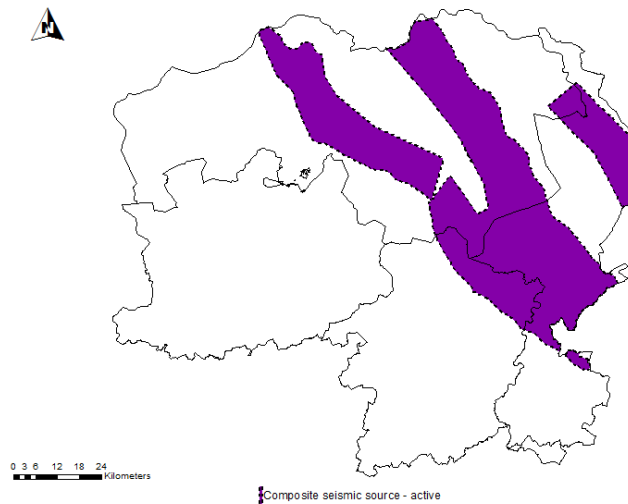
De mate van geothermisch potentieel werd beoordeeld voor zowel de Krijtkalk als de Kolenkalk Groep en is gebaseerd op de activiteit van de breuken. Het toegenomen geothermische potentieel als gevolg van de activiteit van breukzones is hierbij als volgt gecodeerd:

- Geen potentieel: Geen gekarteerde breuken of de Krijtkalk Groep/Kolenkalk Groep is afwezig.
- Weinig potentieel: Aanwezigheid van breuken in de Krijtkalk Groep/Kolenkalk Groep maar zonder indicatie voor recente activiteit.
- Gemiddeld potentieel: Aanwezigheid van breuken in de Krijtkalk Groep/Kolenkalk Groep met bekende historische seismische activiteit (aardbevingen) *of* aanwezigheid van breuken in Quartaire lagen.
- Hoger potentieel: Aanwezigheid van breuken in de Krijtkalk Groep/Kolenkalk Groep met bekende historische seismische activiteit (aardbevingen) *en* aanwezigheid van breuken in Quartaire lagen of gebieden gekarteerd als seismisch actief door Vanneste et al. (2013).

Dit werd bepaald door rekening te houden met de volgende factoren:

#### 2.3.1. GEKARTEERDE SEISMISCH ACTIEVE GEBIEDEN

In een recente studie door Vanneste et al. (2013) werden de seismisch actieve zones in de Roerdalslenk geïdentificeerd. De Roerdalslenk is een deel van de Interreg regio waarvan het bekend is dat het seismisch actief is. Vanneste et al. (2013) hebben geen individuele seismische activiteiten gekoppeld aan individuele breuken omdat aardbevingen zelden aan de oppervlakte worden gevoeld. In de plaats daarvan karteerden zij gecombineerde seismische bronnen aan de oppervlakte en creëerden veelhoeken die correspondeerden met de projecties aan het oppervlakte. Van breuken die deze veelhoeken kruisten werd aangenomen dat deze gerelateerd zijn aan de seismische bronnen. Van deze breuken wordt om deze redenen aangenomen dat zij een hoge waarschijnlijkheid hebben voor recente seismische activiteit.



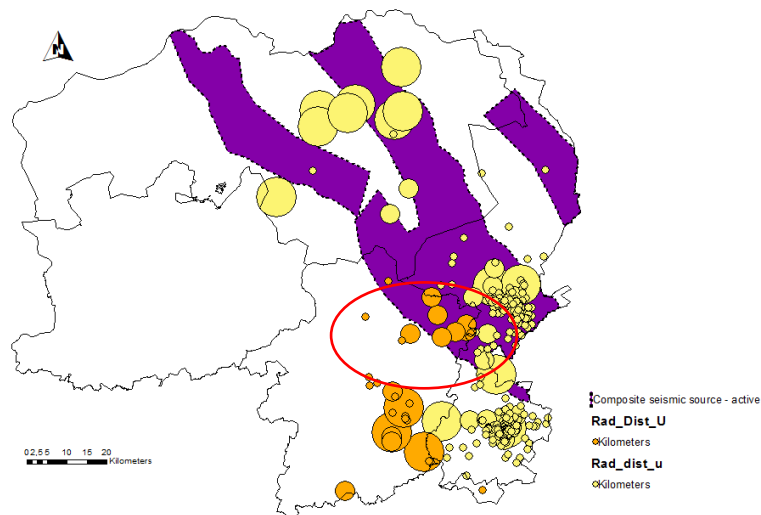
*Figuur 3: Gecombineerde seismische bronnen die seismisch actieve zones in de Roerdalslenk aanduiden. Figuur uit Vanneste et al. (2013).*

Omdat deze analyse alleen beschikbaar is voor de Roerdalslenk is de breukactiviteit ook op een andere wijze bepaald:

### 2.3.2. HISTORISCHE AARDBEVINGSDATA

Geregistreerde aardbevingen geven een indicatie van welke gebieden seismisch actief waren sinds deze registratie begon in 1904 in Vlaanderen en 1906 in Nederland. Epicentra van aardbevingen geregistreerd door het Koninklijk Observatorium van België voor Vlaanderen en het KNMI voor Nederland zijn gecombineerd. Locatie van de Epicentra zijn op de breukenkaarten geploteerd. Omdat de methoden om het exacte epicentrum te bepalen over de jaren significant verbeterd zijn, zijn de epicentra geploteerd als cirkels met een straal die de onzekerheid in de locatie van het epicentrum representeert (Figuur 4).

- Historisch pre-instrumenteel = 20-50 km, en om deze reden niet in aanmerking genomen
- Instrumenteel voor 1958 = 10 km
- 1960-1985 = 3 – 5 km
- Vanaf 1985 = < 2 km

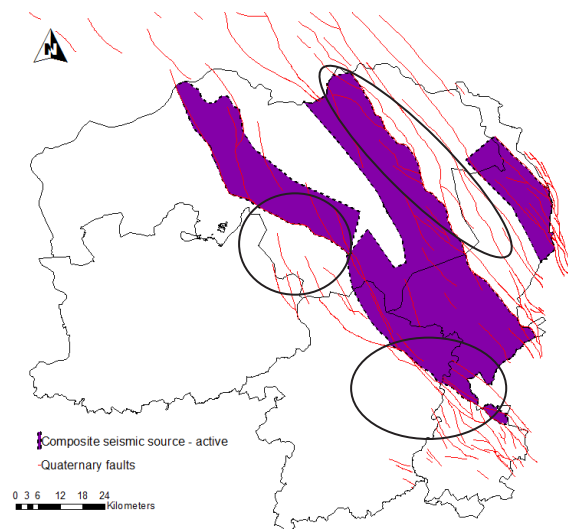


*Figuur 4: Locaties van de epicentra van aardbevingen. De grootte van de cirkels is gerelateerd aan de onzekerheid van het epicentrum. Gele cirkels zijn aardbevingen in Nederland en oranje cirkels zijn aardbevingen in Vlaanderen. De rode ellips geeft het gebied aan waar aardbevingen geregistreerd zijn buiten de Roerdalslenk.*

De aardbevingen werden toegeschreven aan de gekarteerde actieve breuken uit Vanneste et al. (2013) wanneer de zone van de onzekerheid en de gekarteerde actieve gebieden overlappen. Wanneer er geen actieve gekarteerde breuken in de nabijheid gevonden werden, dan werd van andere breuken die overlaptten met de zones van de onzekerheid van de epicentra aangenomen dat deze actief waren. Verder werd, indien van een deel van een breuk werd geconstateerd dat deze actief was, de gehele aaneengesloten breuk actief verondersteld.

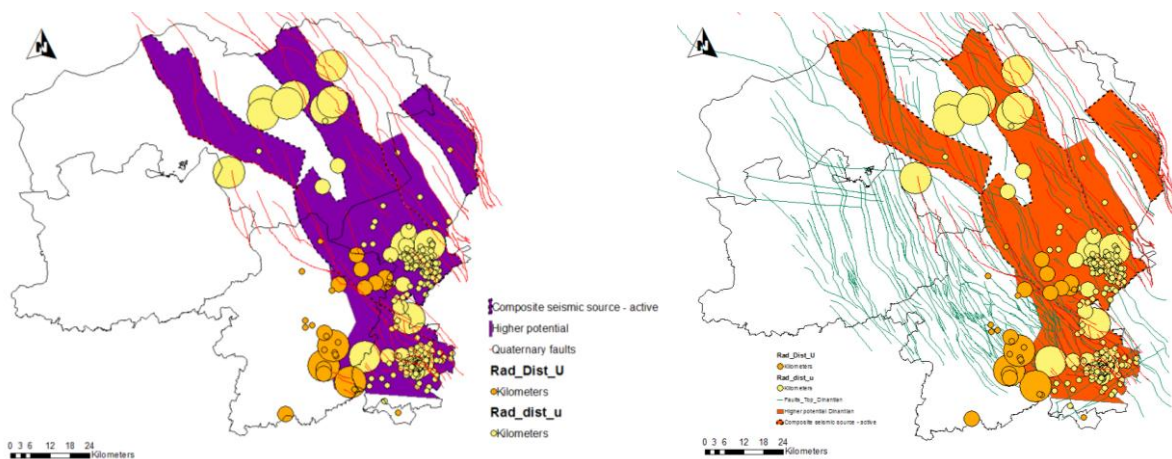
### 2.3.3. BREUKEN DIE DOOR QUARTAIRE LAGEN SNIJDEN

Het is mogelijk dat er in een bepaalde regio geen aardbevingen zijn voorgekomen in historische tijden. Het is echter mogelijk dat informatie over recente (Quartaire) geologische activiteit relevant is om te bepalen hoe de diagenetische situatie op dit ogenblik is, hetgeen ook informatie kan geven over de huidige spanningssituatie. Op de Quartair-kaarten van VITO en TNO waarop breuken gekarteerd zijn die tijdens het Quartair actief waren is duidelijk te zien dat er tijdens het Quartair verschillende gebieden actief waren (Figuur 5).



*Figuur 5: Gekarteerde breuken die Quartaire lagen aansnijden. De zwarte cirkels geven gebieden aan die niet als seismisch actief gekarteerd zijn.*

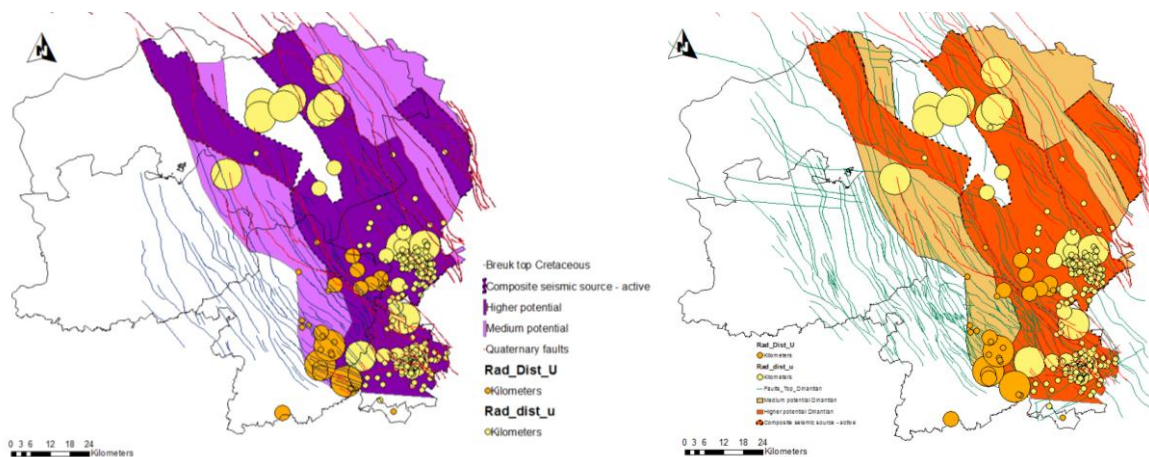
In gebieden waarin historische aarbevingsdata en Quartaire breuken worden gekarteerd, hebben deze breuken een grote kans recentelijk actief te zijn geweest. Deze gebieden zijn ook gecodeerd als gebieden met een hoger geothermisch potentieel.



*Figuur 6: Gebieden met een hoger geothermisch potentieel, inclusief gebieden met zowel breuken actief in het Quartair als historisch gerapporteerde aardbevingsepicentra. Links voor de Krijtcalc Groep en rechts voor de Kolenkalk Groep.*

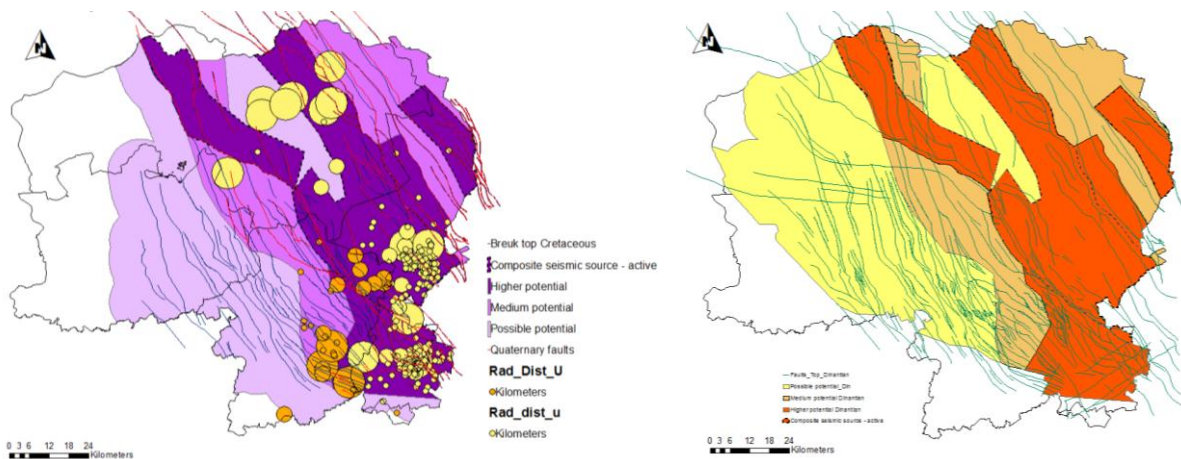
De status van de activiteit in gebieden met of actieve breuken gedurende het Quartair of historisch geregistreerde aardbevingen is onzekerder. Deze gebieden zijn hieronder gekarteerd met een gemiddeld geothermisch potentieel.





*Figuur 7: Regio's met gemiddeld geothermisch potentieel. Dit zijn gebieden met **of** actieve breuken gedurende het Quartair **of** historisch geregistreerde aardbevingen. Links voor de Krijtkalk Groep en rechts voor de Kolenkalk Groep.*

Gebieden met breuken, maar geen indicaties voor recente activiteit worden beschouwd als gebieden met weinig potentieel. Eventueel geothermisch potentieel in deze gebieden is voornamelijk afhankelijk van het voorkomen van toegenomen permeabiliteit in gekarstificeerde kalkstenen (Ferket et al., 2009). Karstificatie is echter in veel gevallen een lokaal fenomeen en afhankelijk van een groot aantal parameters die bepaald moeten worden voor specifieke locaties.



*Figuur 8: Regio's met weinig geothermisch potentieel, geen bewijs voor recente seismische activiteit. Links voor de Krijtkalk Groep en rechts voor de Kolenkalk Groep.*

---

## HOOFDSTUK 3. RESULTATEN

---

Gebieden met verhoogd geothermisch potentieel worden voor zowel de Krijtkalk Groep als de Kolenkalk Groep gevonden in de Roerdalslenk, in het zuiden van Nederlands Limburg en het oosten van Belgisch Limburg. Vier van de zes potentiële studielocaties worden binnen deze regio's gevonden: Eindhoven, Kessenich, Agropolis en Maastricht. Eindhoven en Maastricht liggen dicht bij gekarteerde breuk zones, zodat breuken op deze locaties het geothermisch potentieel kunnen vergroten voor zowel de Krijtkalk als de Kolenkalk. Kessenich en Agropolis liggen echter niet in de nabijheid van gekarteerde breukzones, op deze locaties zal dus, ondanks dat ze in een gebied liggen met een hoger geothermisch potentieel, extra onderzoek noodzakelijk zijn om te bepalen of actieve breuken al dan niet aanwezig zijn.

Gebieden met een gemiddeld potentieel liggen over het algemeen aan de flanken van de gebieden met een hoger potentieel, vooral langs de flanken en in het centrum van de Roerdalslenk. Geen enkele van de zes studielocaties liggen echter in de gebieden met een gemiddeld potentieel.

Gebieden met weinig potentieel vullen het grootste deel van de rest van de kaarten op, voor zover er breuken aanwezig zijn zonder aanwijzingen voor recente activiteit. De locaties van deze gebieden verschillen licht voor de Krijtkalk Groep en de Kolenkalk Groep, hoewel het algemene beeld overeenkomt, maar wel afhankelijk is van de locatie van de breuken en het voorkomen van deze intervallen. De locatie Parkwijk in Turnhout wordt bijvoorbeeld gevonden in een gebied met weinig potentieel voor zowel de Krijtkalk als de Kolenkalk Groepen. Een breuk is gekarteerd in de nabijheid van deze locatie in de Kolenkalk Groep. Om een betere evaluatie van het geothermisch potentieel op deze locatie te kunnen maken is het noodzakelijk dat de diagenetische geschiedenis op deze locatie beoordeeld wordt. Breuken in de Krijtkalk Groep worden niet in de nabijheid van deze locatie gevonden.

In het westen (Antwerpen) en zuiden (Limburg) van de Vlaamse provincies vinden we gebieden zonder geothermisch potentieel in de Krijtkalk en de Kolenkalk Groepen omdat deze gesteentensequenties daar afwezig zijn. De onderzoekslocatie te Ekeren, Antwerpen wordt gevonden in een van deze gebieden in het uiterste westen van de provincie Antwerpen.

## HOOFDSTUK 4. BESLUIT

---

In deze studie zijn breukenkaarten gecorreleerd over de Nederlands-Vlaamse grens. De breuken zijn geëvalueerd op hun potentieel om vloeistofstromingen te focussen volgens de lithologie en de aanwezige breuken en recente breukactiviteiten.

De kans dat het geothermisch potentieel langs breuken in de Krijtkalk en de Kolenkalk Groepen is toegenomen is het grootst in de Roerdalslenk. De onderzoekslocaties van Eindhoven, Agropolis, Kessenich en Maastricht liggen in deze regio. Er is verder tevens een mogelijkheid dat het geothermisch potentieel langs breuken is toegenomen in Turnhout. De kleinste kans dat het geothermische potentieel langs breuken is toegenomen, is in het westen van de provincie Antwerpen waar zich onder andere de Antwerpse studielocatie bevindt.



## REFERENTIES

- Bense, V.F., T. Gleeson, S.E. Loveless, O. Bour & J. Scibek. 2013. Fault zone hydrogeology. *Earth Science Reviews*, **127**: 171-192.
- Billi, A. 2005. Grain size distribution and thickness of breccia and gouge zones from thin strike-slip fault cores in limestone. *Journal of Structural Geology*. **27**(10): 1823-1837.
- Databank Ondergrond Vlaanderen (DOV). <https://dov.vlaanderen.be/dovweb>
- Gibson, R.G. 1998. Physical character and fluid-flow properties of sandstone-derived fault zones. In: Coward, M.P., Daltaban, T.S. & Johnson, H (Eds). *Structural Geology in Reservoir Characterisation*. Geological Society Special Publication. **127**: 83-97.
- Heidbach, O., Tingay, M., Barth, A., Reinecker, J., Kurfeß, D. & Müller, B. 2008. The World Stress Map database release 2008 doi:10.1594/GFZ.WSM.Rel2008.
- Heidbach, O., Tingay, M., Barth, A., Reinecker, J., Kurfeß, D. & Müller, B. 2009. Global crustal stress pattern based on the World Stress Map database release 2008. *Tectonophysics*. **482**: 3-15.
- Loveless, S.E., Pluymaekers, M., Lagrou, D., Laenen, B., Doornenbal, H. & De Boever, E. 2013. Mapping the geothermal potential of fault zones in the sedimentary basins of the Belgian and Netherlands border region. EGU General Assembly 2014. Vienna, 27 April – 2 May 2014. (ingediend).
- Loveless, S.E. 2013. The hydrogeological structure of fault zones in poorly lithified sediment, Gulf of Corinth rift. PhD Thesis. University of East Anglia, Norwich, UK.
- Micarelli, L., Benedicto, A. & Wibberley, C. A. J. 2006a. Structural evolution and permeability of normal fault zones in highly porous carbonate rocks. *Journal of Structural Geology*. **28** (7): 1214-1227.
- NL Olie- en gasportaal (NLOG), [http://www.nlog.nl/en/pubs/maps/geologic\\_maps/NCP1.html](http://www.nlog.nl/en/pubs/maps/geologic_maps/NCP1.html)
- Roberts, G. & Stewart, I. 1994. Uplift, deformation and fluid involvement within an active normal fault zone in the Gulf of Corinth, Greece. *Journal of the Geological Society*. **151**(3): 531-541.
- Sibson, R. H. 1977. Fault rocks and fault mechanisms. *Journal of the Geological Society*. **133**: 191-213.
- Vanneste, K., Camelbeeck, T., Verbeeck & K. 2013. A Model of Composite Seismic Sources for the Lower Rhine Graben, Northwest Europe. *Bulletin of the Seismological Society of America*. **103**: 984-1007.
- Wiprut, D. & Zobak, M.D. 2002. Fault reactivation, leakage potential, and hydrocarbon column heights in the northern north sea. In: Koestler, A.G. and Hunsdale, R. (Eds). *Hydrocarbon Seal Quantification*. NPF Special Publication. **11**: 203-219.

## BIJLAGE 1

Process	Product	Description	Poorly lithified sediments	Clastic sedimentary	Carbonate sedimentary	Crystalline rock
<b>Fault processes that enhance permeability</b>						
Brecciation	Fault mega breccias, breccias, microbreccia	Rock that has been broken into angular clasts as a result of applied tectonic stresses.		Hippler 1993; Eichhubl <i>et al.</i> 2009	Roberts and Stewart 1994; Billi 2005;	Bruhn <i>et al.</i> 1994;
Fracturing	Shear fractures, joints	Discrete, roughly planar discontinuity across which there has been rock separation.		Laubach 1988; Eichhubl <i>et al.</i> 2009	Roberts and Stewart 1994; Ferrill <i>et al.</i> 2004	Caine and Tomasiak 2003; Martel 1990
Particulate/ granular flow	Disaggregation bands, dilation bands	Tabular zones of grain deformation a few mm in width, up to tens of meters in length, each band may accommodate a few cm of slip (Aydin 1978). Grains are neither crushed nor compacted but sediment structure is disaggregated (Du Bernard <i>et al.</i> 2002) formed by grain rolling and sliding. Porosity increase is greater in dilation bands.	Du Bernard <i>et al.</i> 2002; Esner and Graseman 2010			
	Sediment smear	Entrainment and smear of sediment beds into the fault zone and along the fault zone.	Bense and Person (2006)			
<b>Fault processes that reduce permeability</b>						
Brecciation/ cataclasis	Fault gouge	Fracturing of grains into smaller constituent parts forming fine grained, incohesive rock with > 30 % visible fragments surrounded by matrix .		Engelder 1974; Gibson 1998	Ferrill and Morris 2003; Benedetto <i>et al.</i> 2008	Chester and Logan 1987; Schulz and Evans 2009
Cataclasis	Shear/cataclastic deformation bands	As disaggregation bands above, in which grains are also fractured (cataclasis) and/or compacted as a result of shear stresses.	Sigda <i>et al.</i> 1999; Cashman and Cashman 2000	Aydin 1978; Antonellini and Aydin 1994 and 1995	Rath <i>et al.</i> 2011	
	Cataclasite, ultracataclasite	Cohesive fault rock formed from grains fracturing (cataclasis), 15-20 % fragments in finer grained matrix (Kearey, 2001).	Balsamo and Storti 2010	Labbaume <i>et al.</i> 2001; Tuckmantel <i>et al.</i> 2012	Agosta and Kirschner 2003; Micarelli <i>et al.</i> 2006	Chester and Logan 1987
Phyllosilicate smearing	Phyllosilicate band	As disaggregation bands and deformation bands above, in which a significant proportion of clay grains are entrained and aligned along the band.		Antonellini <i>et al.</i> 1994; Knipe 1997		
	Clay smear	Smearing of clay-sized material along the fault plane, or into the fault zone for which the protolith must have a high proportion of clay.	Rawling <i>et al.</i> 2001; Bense and Van Balen 2004	Lindsay <i>et al.</i> 1993; Egholm <i>et al.</i> 2008	Ferrill <i>et al.</i> 2004; Bonson <i>et al.</i> 2007	
Frictional melting	Pseudotachylite	Glass-like fine grained rock formed by heating from shear displacement.		Rowe <i>et al.</i> 2005	Craddock <i>et al.</i> 2012	Lin 1996; Sibson 1977
Particulate/ granular flow	Zone of mixed sediment	Zone in which sediment from different beds are mixed at the grain-scale.	Heynekamp <i>et al.</i> 1999; Rawling and Goodwin 2006			
<b>Fault processes that may increase or reduce permeability</b>						
Shear localisation	Slip surface	Localised zone, often a plane along which significant displacement is focused.	Heynekamp <i>et al.</i> 1999; De Boever <i>et al.</i> 2011	Antonellini and Aydin 1994 and 1995	Roberts and Stewart 1994; Bastesen <i>et al.</i> 2009	Bruhn <i>et al.</i> 1994; Walker <i>et al.</i> 2012
	Lenses or blocks	Blocks of largely undeformed sediment bound by localised shear zones.	Heynekamp <i>et al.</i> 1999	Lindanger <i>et al.</i> 2007	Bastesen <i>et al.</i> 2009; Lindanger <i>et al.</i> 2007	Lee and Kim 2005

Deformatieprocessen in breukzones en structurelementen met invloed op permeabiliteit en voorkomen. Donkergrijze en lichtgrijze vakken geven veel voorkomende en minder voorkomende elementen voor een gegeven lithologie aan. De tabel geeft tevens voorbeelden uit de literatuur. Vakken zonder tekst geven structurele elementen weer welke niet zijn waargenomen. Tabel overgenomen vanuit Loveless (2013) met aanpassingen door Bense et al. (2013).