

GMPE conversietool TLS Geothermie

Achtergrondinformatie

**Energy & Materials
Transition**

www.tno.nl
+31 88 866 42 56
info@tno.nl

TNO 2025 R11632 – 26 juni 2025

GMPE conversietool TLS Geothermie

Achtergrondinformatie

Auteurs	Maaijwee, C.N.P.J.
Rubricering rapport	TNO Public
Titel	TNO Public
Rapporttekst	TNO Public
Aantal pagina's	12 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	0

Alle rechten voorbehouden

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

© 2025 TNO

Inhoudsopgave

1	Inleiding	4
2	Gebruikshandleiding	5
2.1	TLS Magnitude	5
2.2	BMR2 GMPE Magnitude naar PGV	6
3	Rekenmethode	9
3.1	Formules van het grondbewegingsmodel	9
3.2	Bepaling van de Magnitude op basis van PGV	10
4	Beperkingen aandachtspunten en onzekerheden	11
5	Verwijzingen	12

1 Inleiding

Een aanvrager van een start- en vervolgv vergunning voor geothermie moet een Seismisch Risico Beheersplan (SRB) indienen. Dit plan beschrijft hoe en door wie mogelijke bodemtrillingen door geothermische activiteit worden gemeten, en hoe daarop wordt gereageerd. Een onderdeel van het SRB is een traffic light system (TLS). Dat is een schema met acties die nodig zijn als bepaalde drempelwaarden worden overschreden.

Op de NLOG-website staat [een TLS die in opzet voldoet voor het SRB geothermie](#)¹. Hierin staat welke effecten aan het oppervlak merkbaar kunnen zijn als een bepaalde mate van groundbeweging wordt gemeten en welke acties dan nodig zijn. In de TLS wordt specifiek gekeken naar de piekgroundbeweging (PGV). De PGV is de maximale snelheid waarmee de grond beweegt tijdens bodemtrillingen. Bij elke PGV-drempelwaarde horen acties. Hoe hoger de PGV, hoe groter de mogelijke schade aan het oppervlak. Daarom zijn bij een hogere PGV meer acties en strengere maatregelen nodig. In het uiterste geval wordt de productie stopgezet.

Het voorbeeld op de NLOG-website gaat ervan uit dat de metingen door het KNMI-netwerk worden gedaan en dat het KNMI de eigenschappen van de eventuele trilling ook bekend maakt. In dat geval publiceert het KNMI de magnitude (lokale magnitudeschaal) van de trilling. Volgens het voorbeeld van het TLS moet deze magnitude wel eerst worden vertaald naar PGV en vergeleken worden met PGV-drempelwaarden. Met een groundbewegingsmodel (GMPE) kan een magnitude naar een PGV worden omgezet. Hetzelfde model kan ook het omgekeerde; de PGV-drempelwaarden omzetten naar magnitudes. De omzetting heeft wel meerdere afhankelijkheden waaronder de diepte van de trillingsbron en de lokale eigenschappen van de ondiepe bodem en diepe ondergrond. Daarnaast is er een bepaalde mate van onzekerheid bij de omzetting.

De Excel-tool die in dit document wordt beschreven, maakt deze omzetting mogelijk zonder complexe software of handmatige omrekeningen en maakt de bijbehorende onzekerheden inzichtelijk. Dit document geeft achtergrondinformatie over de werking van deze Excel-tool, de gebruikte rekenregels en aannames en hoe de omzetting via het groundbewegingsmodel tot stand komt. Daarnaast wordt uitgelegd hoe deze tool in de praktijk kan worden gebruikt en welke beperkingen, aandachtspunten en onzekerheden er zijn.

¹ Ministerie van Klimaat en Groene Groei, „Seismisch respons en beheerssysteem voor geothermie,” 2024. <https://www.nlog.nl/seismisch-respons-en-beheerssysteem-voor-geothermie>. Zie ook [4]

2 Gebruikshandleiding

De Excel-tool heeft drie werkbladen. In het werkblad “*TLS Magnitude*” kan de gebruiker de magnitudes berekenen die bij de PGV drempelwaarden volgens het voorbeeld op NLOG horen op een specifieke diepte. Dit is de verwachte diepte van de trillingsbron (hypocentrum) van de mogelijk geïnduceerde aardbeving en volgens de Seismische Dreigings- en Risico Analyse (SDRA) Geothermie de reservoirdiepte.

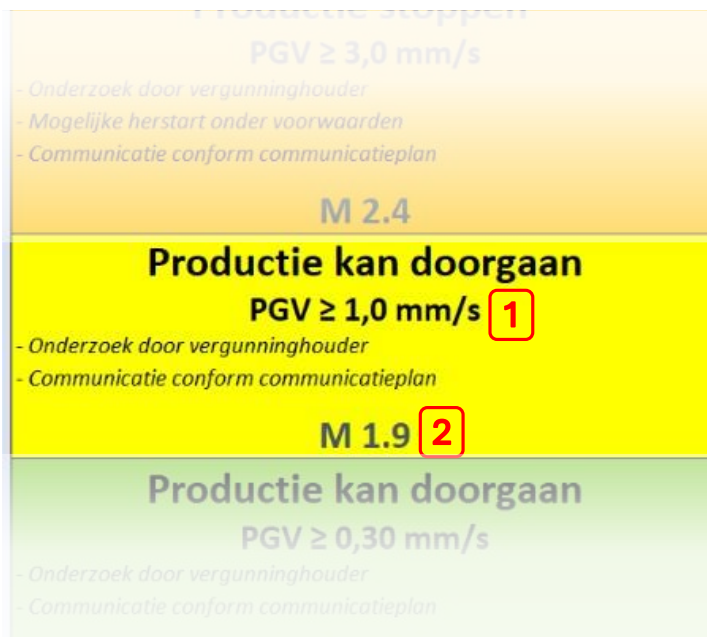
Het werkblad “*BMR2 GMPE Magnitude naar PGV*” stelt de gebruiker in staat meer gedetailleerde berekeningen uit te voeren met het grondbewegingsmodel. Het werkblad “*Achterliggende formules*” geeft een opsomming van de formules en methode die gebruikt zijn voor de berekeningen in de andere werkbladen.

2.1 TLS Magnitude

In het werkblad “*TLS Magnitude*” moeten twee invoerparameters worden ingevuld, namelijk de diepte van de top van het reservoir (top-reservoir) en de gewenste P-waarde (waarschijnlijkheid van de waarde) van de uitvoer. De top-reservoirdiepte is de verticale diepte vanaf het maaiveld in meters.

De omzetting van PGV naar magnitude heeft een onzekerheid. Volgens het achterliggende grondbewegingsmodel zijn meerdere magnitude-waarden mogelijk voor één PGV waarde en deze zijn verdeeld volgens een normale kansverdeling. De uitvoer P-waarde geeft aan waar de berekende magnitude binnen de kansverdeling ligt. In de tool geeft een hogere P-waarde een conservatieve uitkomst. In de praktijk betekent dit dat een hoge P-waarde ervoor zorgt dat de PGV-drempelwaarde eerder bereikt wordt bij dezelfde magnitude. De gebruiker kan kiezen uit een geselecteerd aantal P-waarden. Standaard staat de P-waarde op P50. Dit is ook de mediaan van de magnitudeverdeling. In de TLS van de NLOG-website wordt ook uitgegaan van deze P50-waarde.

Als een van de invoerparameters verandert, rekent de Excel-tool automatisch nieuwe magnitudes uit. Midden in het werkblad staan een aantal gekleurde vlakken onder elkaar. De kleuren en inhoud hiervan komen overeen met de categorieën van het TLS. De berekende magnitudes, voorafgegaan door een *M*, staan aan de onderkant van elk gekleurd vlak en corresponderen met de PGV-drempelwaarden van dat vlak (zie Figuur 1 voor een voorbeeld van een van deze gekleurde vlakken). De PGV- en magnitude-drempelwaarde is in alle gevallen de ondergrens van de categorie waarbij bepaalde acties moeten worden uitgevoerd.



Figuur 1: Voorbeeld van een van de gekleurde vlakken uit het werkblad "TLS Magnitude". De kleur van het vlak, de acties en PGV-drempelwaarde (aangegeven met het rode cijfer 1) corresponderen met het TLS van de NLOG-website. De berekende ondergrensmagnitude staat onderaan (aangegeven met het rode cijfer 2).

In het voorbeeld in Figuur 1 is een top-reservoirdiepte van 3.000 meter en een P50 magnitudewaarschijnlijkheid ingevuld. In het theoretische voorbeeld dat er een trilling optreedt met een magnitude van M 2,0, gelden de acties in het gele vlak (de ondergrens van het bovenliggende oranje vlak is in dit voorbeeld een magnitude van M 2,4). De productie kan in dit voorbeeld doorgaan, maar moet er een onderzoek door de vergunninghouder worden gedaan. De gebeurtenis moet ook worden gecommuniceerd volgens het communicatieplan dat in de SRB beschreven staat.

2.2 BMR2 GMPE Magnitude naar PGV

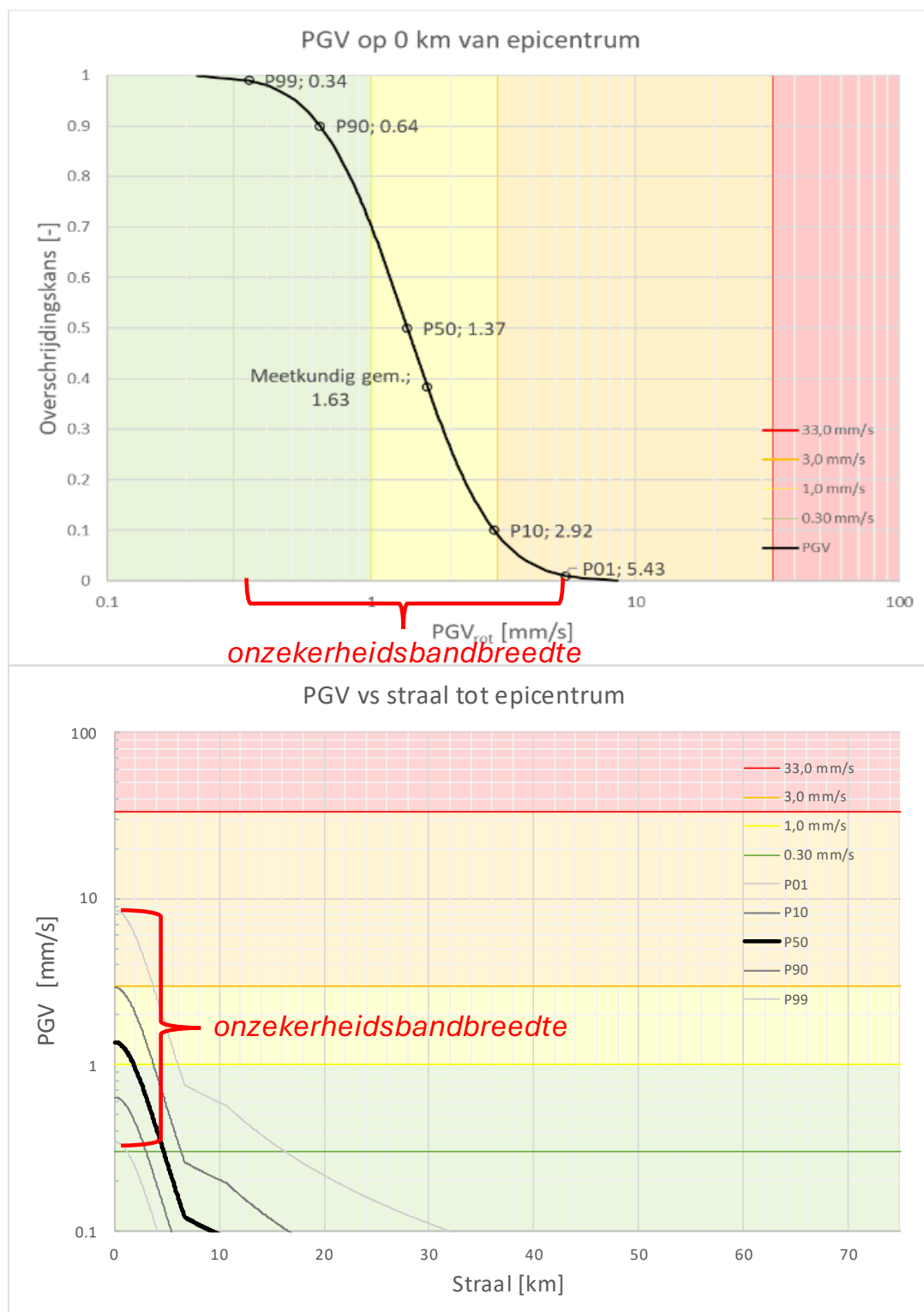
In het werkblad "BMR2 GMPE Magnitude naar PGV" staan drie invoervelden. Met dit werkblad kan magnitude worden omgezet naar PGV. De gebruiker vult hier een magnitude in, de verticale diepte van de trillingsbron (hypocentrum, in meters) onder het maaiveld en de horizontale afstand tot het punt aan het maaiveld dat loodrecht boven de trillingsbron ligt (epicentrum, in kilometers).

Als uitvoer wordt een selectie P-waarden van PGV gegeven samen met het meetkundig gemiddelde. Deze waarden komen ook terug in de overschrijdingskansgrafiek aan de linkerkant van het werkblad. De bovenste grafiek in Figuur 2 geeft hiervan een voorbeeld. De P99 PGV_{ROT}-waarde van 0,34 mm/s laat zien dat er een 99% kans is op een groundbeweging groter dan 0,34 mm/s.

De rechter grafiek in het werkblad (zie voorbeeld Figuur 2, onder) geeft weer hoe de PGV aan het oppervlak afneemt wanneer de horizontale afstand tot de trillingsbron groter wordt. In de rechter grafiek staan de verwachte waarden (P50) en de onzekerheidsbandbreedte aangegeven (aangegeven met de P99-, P90-, P10- en P01-lijn). In de achtergrond van de grafieken zijn de verschillende PGV drempelwaarden en de bijbehorende TLS kleurencode ingekleurd.

Om een vergelijking te maken met de resultaten uit het werkblad "TLS Magnitude", moet de gebruiker de top-reservoirdiepte invullen als diepte van het hypocentrum en de horizontale

afstand tot het epicentrum op 0 km zetten. In het voorbeeld in Figuur 2 is een magnitude M 2,0 ingevuld met een hypocentrum op 3.000 meter diepte en een epicentrum op 0 km afstand. Volgens het TLS-voorbeeld op de NLOG-website moet de P50 PGV-waarde worden afgelezen. in dit geval is die 1,37 mm/s. Deze waarde valt binnen het gele vlak van het TLS (zie ook Figuur 1). In dit theoretische geval kan productie doorgaan, maar moet er een onderzoek door de vergunninghouder worden gedaan. De gebeurtenis moet ook worden gecommuniceerd volgens het communicatieplan dat in de SRB beschreven staat.



Figuur 2: Boven: Overschrijdingskans grafiek van de PGV die volgt uit het groundbewegingsmodel op het epicentrum (0 km) bij een magnitude M 2,0 en hypocentrum op 3.000 meter diepte. Onder: het verloop van de PGV met toenemende afstand vanaf het epicentrum. De rode accolade geeft in beide grafieken de onzekerheidsbandbreedte aan op een afstand van 0 km (tussen de P01- en P99-lijn).

3 Rekenmethode

De formules in de Excel-tool zijn gebaseerd op het werk van Ruigrok en Dost, 2020 [1]. In hun rapport beschrijven zij hoe ze het grondbewegingsmodel met de naam BMR-2 hebben afgeleid. Het rapport geeft advies over het berekenen van PGV voor gasvelden buiten Groningen. Ze hebben een model aangepast dat oorspronkelijk voor Groningen was ontwikkeld. Hun aangepaste model houdt rekening met de diepte van aardbevingen en de variabiliteit van de grondbeweging voor bevingen buiten Groningen. In de formules hieronder wordt PGV_{rot} uitgerekend. Er zijn verschillende manieren om een gemeten PGV te beschrijven. PGV_{rot} geeft de grootste horizontale grondbeweging en het geeft de meest conservatieve uitkomst.

3.1 Formules van het grondbewegingsmodel

De schatting van PGV_{rot} (mm/s) op basis van Magnitude M , diepte D (tot epicentrum in km), afstand R (straal tot epicentrum in km) en percentiel P volgt uit de vergelijkingen:

$$PGV_{rot} = e^{\mathcal{N}^{-1}(P, \ln Y_{mod}, \sigma)}$$

waar:

$\mathcal{N}^{-1}(P, \mu, \sigma)$ de inverse van een normale verdeling is met gemiddelde μ en

standaarddeviatie σ ,

$\ln Y_{mod}$ de natuurlijke logaritme is van de mediaan PGV-waarde,

$\sigma = 0.5926$ de standaarddeviatie van het model is.

$$\ln Y_{mod} = g(R^*) + c_1 + c_2 M$$

waarbij:

$c_1 = 2.28$ en $c_2 = 2.2835$ regressiecoëfficiënten zijn,

$g(R^*)$ een afstandsverzwakkingsfunctie is,

R^* de aangepaste afstand is.

$$R^* = \sqrt{R^2 + D^2 + e^{(e_1 M + e_2)^2}}$$

waarbij:

$e_1 = 0.06$ en $e_2 = 1.13$ empirische coëfficiënten zijn,

R de horizontale afstand tot de aardbevingsbron is (km),

D de focale diepte is (km).

De functie $g(R^*)$ wordt stuksgewijs gedefinieerd:

$$g(R^*) = \begin{cases} c_4 \ln R^*, & R^* \leq d_1 \\ c_4 \ln d_1 + c_{4a} \ln \left(\frac{R^*}{d_1} \right), & d_1 < R^* \leq d_2 \\ c_4 \ln d_1 + c_{4a} \ln \left(\frac{d_1}{d_2} \right) + c_{4b} \ln \left(\frac{R^*}{d_2} \right), & R^* > d_2 \end{cases}$$

waarbij:

$c_4 = -4.28$, $c_{4a} = -0.8$ en $c_{4b} = -1.7$,

$d_1 = 8.1 \text{ km}$ en $d_2 = 11.6 \text{ km}$.

3.2 Bepaling van de Magnitude op basis van PGV

In dit het sheet "*TLS Magnitude*" wordt de magnitude ingeschat direct boven het epicentrum ($R = 0$) bij een gegeven focale diepte, voor alle PGV-grenswaarden zoals gedefinieerd in de TLS voor geothermie². Met de iteratieve bisectiemethode worden de bovenstaande formules gebruikt om de magnitude te vinden zodat:

$$|PGV_{rot}(M, D, R, P) - PGV_{drempelwaarde}| < \epsilon$$

waarbij:

ϵ een kleine tolerantiewaarde is (in dit geval 0.0001).

4 Beperkingen aandachtspunten en onzekerheden

Voor het maken van deze Excel tool is het grondbewegingsmodel van Ruigrok en Dost [1] gebruikt. In hun rapport benadrukken de auteurs dat de resultaten van het model voorzichtig moeten worden geïnterpreteerd vanwege een aantal onzekerheden en beperkingen.

Het grondbewegingsmodel van Ruigrok en Dost [1] is een aanpassing van een model voor het Groningen gasveld en gemaakt op basis van gemeten trillingen uit gasvelden buiten het Groningen gasveld die het gevolg zijn van gaswinning. Het is de intentie van de Excel-tool uitspraken te doen over trillingen die het gevolg zijn van geothermie. In dat geval moet uitgegaan worden van de aanname dat het grondbewegingsmodel ook representatief is in gebieden waar mogelijk geen metingen zijn; de gebieden waar gaswinning heeft plaatsgevonden en waar trillingen zijn gemeten overlappen namelijk niet altijd met de gebieden waar geothermie plaatsvindt. Dat is vooral belangrijk vanwege lokale verschillen in de fysische eigenschappen van het diepe gesteente en ondiepe bodem. Die eigenschappen beïnvloeden de uiteindelijke grondbeweging aan het oppervlak.

Daarnaast zijn alleen metingen gebruikt met magnitudes tussen M 1,5 en M 3,6 en met een hypocentrum van de trillingsbron tussen 2,4 en 3,6 kilometer. Voor dieptes en magnitudes buiten dit bereik, is het grondbewegingsmodel niet gekalibreerd. Als gevolg daarvan zijn de uitkomsten van het model buiten dit bereik mogelijk niet meer representatief en zijn de onzekerheden mogelijk groter dan berekend. Ruigrok en Dost [1] benadrukken dat dat vooral het geval is bij ondiepe trillingen en bij trillingen met lage magnitudes ($M < 1,5$).

In het werkblad “*TLS Magnitude*” moet de diepte van de top van het reservoir worden ingevuld. Hiermee wordt impliciet aangenomen dat het hypocentrum van een mogelijke trilling altijd daar zal plaatsvinden. In werkelijkheid hoeft dit niet het geval te zijn. Modelberekeningen van spanningsveranderingen langs een breukvlak als gevolg van afkoeling, laten zien dat de meest kritische spanning aan de boven- en onderkant van het reservoir ontstaat (zie bijvoorbeeld [2] en [3]). In de tool is ervoor gekozen om de top van het reservoir als invoer nemen, omdat dit de conservatieve optie is.

5 Verwijzingen

- [1] E. Ruigrok en B. Dost, „Advice on the computation of peak ground-velocity confidence regions for events in gas fields other than the Groningen gas field,” 2020.
- [2] L. Buijze, P. Fokker en B. Wassing, Warming up - Quantification of induced seismicity potential of geothermal operations, 2021.
- [3] A. Marelis, F. Beekman en J. van Wees, „3D mechanical analysis of geothermal reservoir operations in faulted sedimentary aquifers using MACRIS,” *Geotherm Energy*, vol. 12, nr. 5, 2024.
- [4] Ministerie van Klimaat en Groene Groei, „Seismisch respons en beheerssysteem voor geothermie,” 2024. [Online]. Available: <https://www.nlog.nl/seismisch-respons-en-beheerssysteem-voor-geothermie>.

Energy & Materials Transition

Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht

www.tno.nl