



Koninklijk Nederlands
Meteorologisch Instituut
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

Seismologische en klimatologische gegevens voor drie mogelijke locaties van nieuwe kerncentrales

De Bilt, 2025 | Technisch rapport; TR-25-09

Colofon

Projectnaam	Seismologische en klimatologische gegevens voor drie mogelijke locaties van nieuwe kerncentrales
Versienummer	2
Locatie	Maasvlakte 2, Eemshaven en Terneuzen
Bijlage(n)	3
Auteur	KNMI

Inhoud

Samenvatting—7

1 Inleiding—8

2 Seismologische achtergrondinformatie—9

- 2.1 Beschikbare registraties van aardbevingen—9
- 2.2 Aardbevingscatalogi—10
- 2.3 Aardbevingen op of nabij mogelijke locaties—14
- 2.4 Overige informatie van belang voor aardbevingen—16

3 Seismische dreiging—19

- 3.1 Zuid-Nederland—19
- 3.2 Regio Groningen—20
- 3.3 Regio Maasvlakte 2—21
- 3.4 Aanbevelingen—22

4 Klimatologische gegevens—24

- 4.1 Klimatologische gegevens voor de periode 2015-2024—24
- 4.2 Winddata per seizoen—25
- 4.3 Klimatologische gegevens voor de periode 2021-2024—26
- 4.4 Herhalingstijden—26
- 4.5 Toekomstig klimaat—28

Bijlage 1 – Referenties—29

Bijlage 2 – Gereviseerde lijst met historische aardbevingen—31

Bijlage 3 – Toelichting SSHAC proces—35

Samenvatting

In opdracht van het ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK) heeft het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI) seismologische en klimatologische gegevens verzameld voor drie locaties mogelijke locaties voor nieuwe kerncentrales. De drie locaties zijn Maasvlakte 2, Terneuzen en Eemshaven.

De seismologische informatie beschrijft de beschikbare historische data (aardbevingen en registraties), seismische dreiging en aanbevelingen. Wij bevelen aan om ter plaatse van de locatie gegevens te verzamelen over de lokale bodemopbouw (V_{S30} , gemiddelde schuifgolfsnelheid over 30 m) en om een seismische dreigingsanalyse uit te voeren met een internationaal geaccepteerd proces (SSHAC) voor een voldoende lange herhalingsperiode van 10.000 jaar.

De klimatologische informatie bevat overzichten van klimatologische grootheden op nabij gelegen KNMI weerstations met tijdreeksen en data over seizoensvariabiliteit. Deze laatste zijn belangrijk om de invloed op golfomstandigheden en zoetwaterafvoer te bepalen.

1 Inleiding

In het kader van de nationale ambities voor de uitbreiding van kernenergie onderzoekt het kabinet meerdere potentiële locaties voor de bouw van nieuwe kerncentrales. Naast de bestaande locatie in Borssele zijn ook Terneuzen, de Tweede Maasvlakte en Eemshaven nadrukkelijk in beeld gebracht als kansrijke vestigingsplaatsen. In opdracht van het ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK) wordt daarom verzocht om, in aanvulling op de eerdere analyse voor Borssele, vergelijkbare seismologische en klimatologische gegevens voor deze drie locaties.

Het doel van deze gegevensverzameling is om op een vroegtijdig moment input te leveren over relevante natuurlijke risico's zoals aardbevingsdreiging en klimatologische extremen. De analyse richt zich op klimaatveranderingseffecten op stormen, neerslag en andere weersextremen en omvat een seismische detailstudie met vergelijkbare aanpak als bij Borssele.

De drie locaties waarvoor de gegevens zijn verzameld zijn Maasvlakte 2, Terneuzen en Eemshaven. Voor deze drie locaties zijn de volgende gegevens verzameld:

- Seismologische informatie:
 - Beschikbare data over historische aardbevingen tot 300 km.
 - Overzicht van beschikbare geregistreerde seismische data: golfvormen, database en metadata.
 - Informatie over beschikbare seismische dreiging op regionale schaal.
 - Aanbeveling over het uitvoeren van een seismische dreigingsanalyse voor kerncentrales.
- Klimatologische informatie:
 - Overzicht van klimatologische grootheden op nabij gelegen KNMI weerstations.
 - Data over seizoenvariëaties ten behoeve van de invloed op golfomstandigheden en zoetwaterafvoeren.
 - Tijdreeksen van temperatuur, neerslag, windsnelheid- en richting gedurende de periode 2020-2023, met samenvattende data, zoals gemiddelde, max, min.

Leeswijzer

De seismologische gegevens zijn opgenomen in hoofdstuk 2 (aardbevingen) en hoofdstuk 3 (seismische dreiging). De klimatologische gegevens zijn opgenomen in hoofdstuk 4. De bijlagen bestaan uit referenties, een overzicht van historische aardbevingen en een toelichting op het SHHAC-proces voor het vaststellen van seismische dreiging.

2 Seismologische achtergrondinformatie

In dit hoofdstuk zijn gegevens opgenomen over de beschikbare registraties van aardbevingssignalen (§2.1), catalogi van aardbevingen (§2.2), aardbevingen op of nabij de mogelijke locaties (§2.3) en andere informatie die van belang is voor de seismische dreiging zoals V_{S30} en opslingering (§2.4).

2.1 Beschikbare registraties van aardbevingen

Om de seismische dreiging voor een locatie vast te stellen wordt meestal uitgegaan van de aardbevingen binnen 200 km van de locatie. Voor de mogelijke locaties van de kerncentrales is gevraagd rekening te houden met een straal van 300 km. De grootte van het te beschouwen gebied is opgenomen in Figuur 1. Bij een straal van 200 km rond de locatie moeten aardbevingen van Nederland, Duitsland, België, Frankrijk en het Verenigd Koninkrijk meegenomen worden. Uitgaande van een straal van 300 km komen Luxemburg en Denemarken daar nog bij.



Figuur 1. Mogelijke locaties van kerncentrales met een gebied van 200 (grijze lijn) of 300 km (zwarte lijn) eromheen. Achtergrondkaart: Google Maps.

Sinds de oprichting van het KNMI in 1854 behoort seismologie tot één van de taken. Aardbevingen worden sinds 1910 met seismometers geregistreerd. De eerste seismometers waren analoge instrumenten die het signaal op rookpapier registreerden. Vervolgens werd de aardbeving handmatig geanalyseerd. De aankomsttijden van de seismische golven werd opgeslagen in de aardbevingen database. In die tijd werden alleen de gegevens van de aardbeving bewaard.

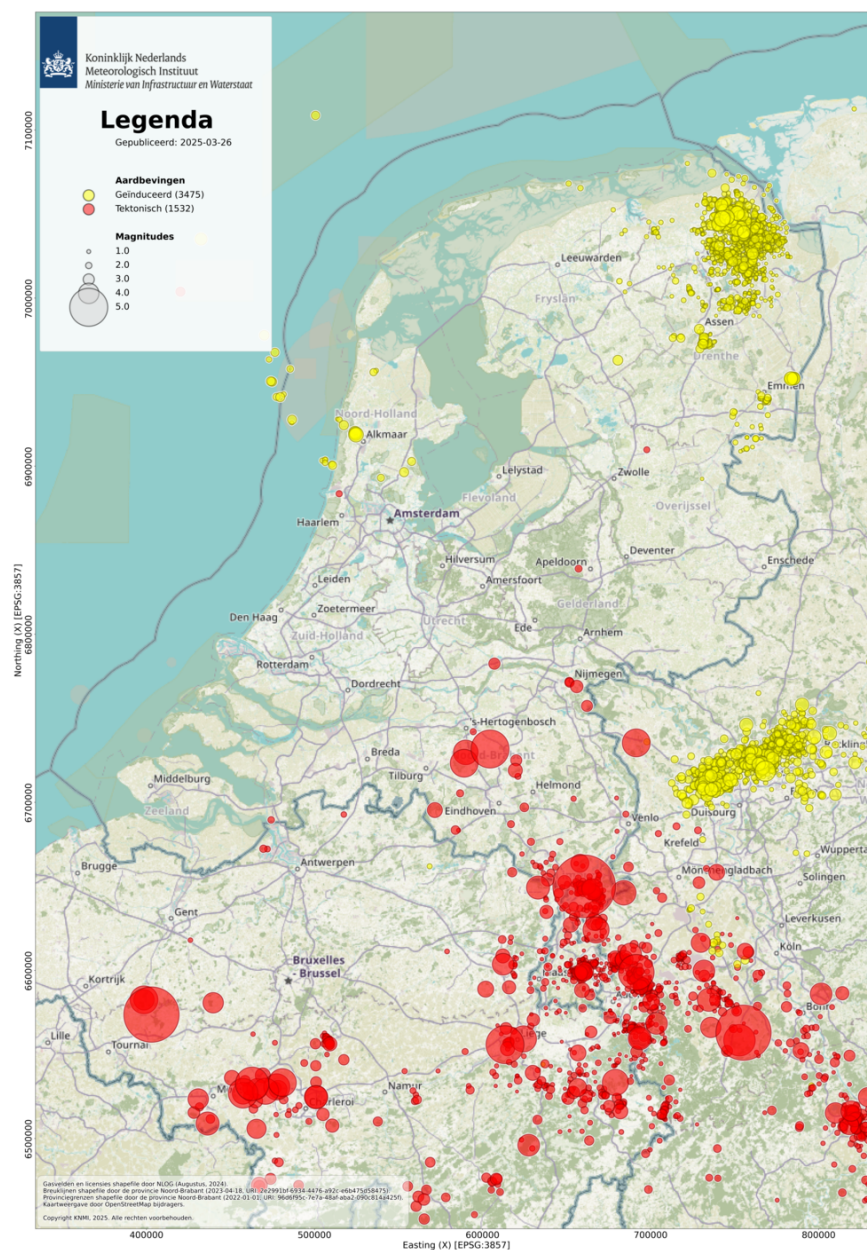
Tegenwoordig vindt registratie van aardbevingen plaats met digitale instrumenten. De digitale seismologische data worden opgeslagen via de Web Services van de International Federation of Digital Seismograph Networks (FDSN). De aardbevingscatalogus (KNMI, 2015) is beschikbaar via <https://rdsa.knmi.nl/fdsnws/event/1/>. Deze catalogus start in 1911. De event data (aankomsttijden, locatie en magnitude) uit het pre-digitale tijdperk zijn handmatig toegevoegd aan FDSN. In die tijd bestond het seismische netwerk uit enkele instrumenten. Daarom waren ook de data van seismometers uit het buitenland nodig om de locatie en magnitude van aardbevingen vast te stellen.

De ontwikkeling van het seismometer netwerk in Nederland is beschreven in Dost en Haak (2002). Naar het netwerk wordt gerefereerd als KNMI (1993). Vanaf 1993 werden digitale registraties van seismometers toegepast in Nederland. Deze digitale registraties leveren in principe continue data op. Niet al deze data zijn in de beginperiode echter opgeslagen. De data die bewaard zijn, bestonden uit de amplitudes van de twee horizontale en verticale componenten gedurende een tijdsinterval van 1 of 2 minuten rondom een aardbeving. Dit is de zogenaamde "getriggerde" data. Toen datacommunicatie verbeterde, werd het mogelijk om de continue data ook op te slaan. De omslag van opslag van getriggerde data naar continue data vond plaats rond 2009-2010. Sinds die tijd is het netwerk flink uitgebreid met stations in Groningen, Drenthe, Friesland, Twente, Noord-Holland en Zuid-Holland.

Alle event data, getriggerde data en continue data zijn beschikbaar via <http://rdsa.knmi.nl/> met links naar ORFEUS en naar de FDSN Web Services. De ruwe golfvormen zijn beschikbaar via <https://rdsa.knmi.nl/fdsnws/dataselect/1/>.

2.2 Aardbevingscatalogi

Na iedere detectie van een aardbeving wordt de catalogus aangevuld met het tijdstip, de locatie en magnitude. De catalogus voor tektonische en geïnduceerde aardbevingen sinds 1911 is ook beschikbaar in csv, json, xml en pdf formaat op <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/dataset/aardbevingscatalogus>. De aardbevingen tot en met 26 maart 2025 zijn weergegeven in Figuur 2.



Figuur 2. Tektonische (rood) en geïnduceerde (geel) aardbevingen uit de KNMI aardbevingscatalogus vanaf 1911 tot en met 26 maart 2025 (KNMI, 2015).

Voor aardbevingen van vóórdat seismometers begonnen met registreren zijn we aangewezen op historische bronnen. Houtgast (1991) heeft de Nederlandse historische aardbevingen geïnventariseerd. Deze lijst is in 2021 nogmaals beoordeeld. Enkele van de beschreven gebeurtenissen bleken waarschijnlijk geen aardbeving te zijn geweest. De herziene lijst van historische aardbevingen is opgenomen in Bijlage 2. De gebeurtenissen die wel als aardbeving zijn aangemerkt zijn daarin in rood aangegeven. De laatste regels van de tabel beschrijven de aardbevingen uit 1911 die ook in de instrumentale aardbevingscatalogus opgenomen zijn.

Uit paleoseismische gegevens is gebleken dat op de Peelrandbreuk in de geologische geschiedenis zwaardere aardbevingen hebben plaatsgevonden dan de 1992 aardbeving bij Roermond. Naar aanleiding van de Roermond aardbeving hebben Van

den Berg et al (2002) ter plaatse van de Peelrandbreuk sleuven gegraven. Uit de waarnemingen aan de wanden van de sleuven hebben ze afgeleid dat er in de laatste 25.000 jaar twee zware aardbevingen zijn opgetreden, rond 15.000 jaar geleden. Deze twee aardbevingen gebeurden relatief kort na elkaar en hadden een magnitude van tussen de 6,0 en 6,6.

In aanvulling op de KNMI aardbevingscatalogus zijn catalogi van omliggende landen relevant. Aardbevingscatalogi van die landen zijn vaak opnieuw beoordeeld als onderdeel van het vaststellen van de nationale aardbevingsdreiging. Voor het Verenigd Koninkrijk van de British Geological Survey (BGS) is de aardbevingscatalogus beschreven in Mosca et al. (2020). De aardbevingscatalogus die gebruikt is in de seismische dreiging van Duitsland is opgenomen in Grünthal et al (2018a) en referenties daarin. De Vlaamse overheid heeft in 2021 de Vlaamse catalogus met een ruime buffer om Vlaanderen heen laten evalueren. Hiervoor zijn diverse catalogi gecombineerd en zijn dubbelingen opgeschoond. Deze opgeschoonde catalogus is beschreven in Qcon (2021). De publieke catalogus kan opgevraagd worden bij Departement Omgeving Vlaanderen, Afdeling Vlaams Planbureau voor Omgeving. Deze dataset wordt echter niet up-to-date gehouden.

Deze beschikbare aardbevingscatalogi zijn samengevat in Tabel 1. Sommige instituten hebben alleen recente aardbevingen op hun site staan, bijvoorbeeld de laatste 10 stuks of in de laatste 12 maanden. De volledige aardbevingscatalogus zou bij het instituut opgevraagd kunnen worden.

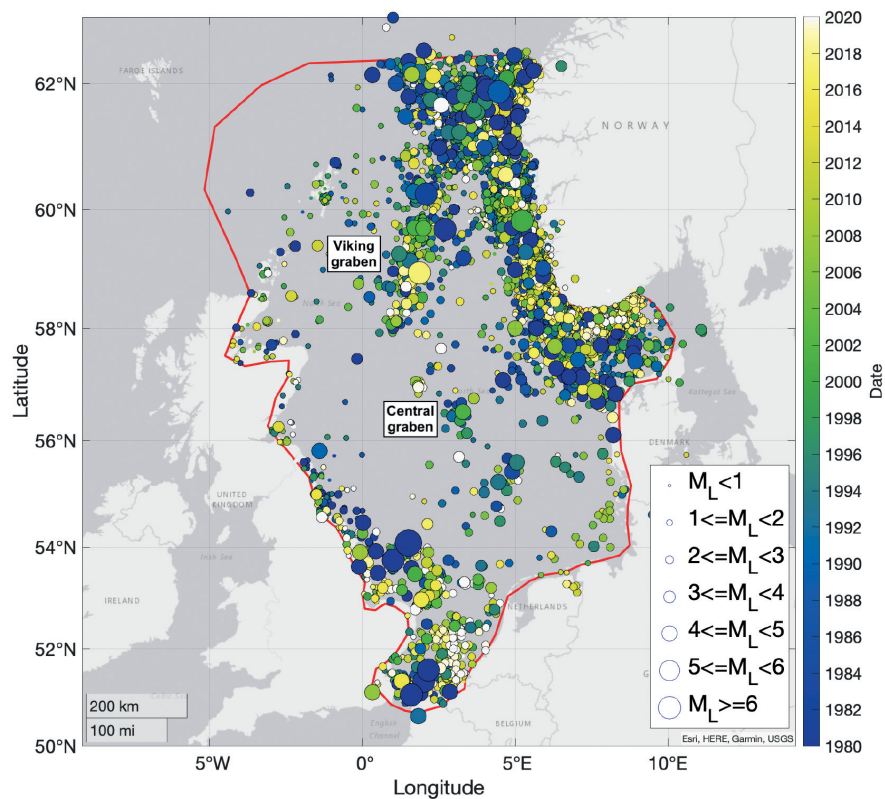
Tabel 1. Aardbevingscatalogi binnen 300 km van de locaties

Land	Seismologisch instituut / project	Link van aardbevingscatalogus	Begin	Eind
Nederland	KNMI	https://rdsa.knmi.nl/fdsnws/event/1/	1911	actueel
Nederland	KNMI	Houtgast (1991). Gereviseerd in Bijlage 2	1007	1911
België	Koninklijke Sterrenwacht van België, Royal Observatory of Belgium (ROB)	https://seismologie.oma.be/en/seismologie/seismicity-in-belgium/instrumental-seismic-catalogue	1900	actueel
België	Koninklijke Sterrenwacht van België, Royal Observatory of Belgium (ROB)	https://seismologie.oma.be/nl/seismologie/seismiciteit-in-belgie/historische-catalogus	700	1910
België	Qcon (2021)	aardbevingscatalogus op verzoek	1350	2021
Luxembourg	European Center for Geodynamics and Seismology (ECGS)	aardbevingscatalogus op verzoek	2012	actueel
Duitsland	Erdbebenstation Bensberg/ Universität zu Köln	https://www.seismo.uni-koeln.de/catalog/index.htm	1975	actueel
Duitsland	Ruhr Universität Bochum	https://fdsnws.geophysik.ruhr-uni-bochum.de/map/	recent	actueel
Duitsland	Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen	https://www.gd.nrw.de/gg_le_erdbebenkatalog.htm	1905	actueel

Tabel 1, vervolg. Aardbevingscatalogi binnen 300 km van de locaties

Duitsland	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)	https://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Seismologie/Seismologie/Aktuelle-Beben-eng/Seis-Online_eng/seis-online_node_eng.html	recent	Actueel
Denemarken	Geological Survey of Denmark and Greenland (GEUS)	https://www.geus.dk/natur-og-klima/jordskaelv-og-seismologi/registrerede-jordskaelv-i-danmark	1954	actueel
Verenigd Koninkrijk	British geological Survey (BGS)	https://www.earthquakes.bgs.ac.uk/earthquakes/dataSearch.html	1000	actueel
Verenigd Koninkrijk	British geological Survey (BGS)	Mosca et al (2020)	1904	2020
Noordzee	SHARP	https://www.isc.ac.uk/dataset_repository/search.php	1980	2020
Frankrijk	Le Bureau Central Sismologique Français Le Réseau National de Surveillance Sismique (BCSF-Réness)	https://api.franceseisme.fr/fr/search	1980	actueel
Europa	European-Mediterranean Earthquake Catalogue – Version 2021 (EMEC-2021)	https://www.gfz.de/emec/	1000	2021
Europa	Euro-Mediterranean Seismological Centre (EMSC)	https://www.emsc.eu/Earthquake_information/	2004	actueel
Europa	SHARE European Earthquake Catalogue (SHEEC) 1000-1899	https://www.emidius.eu/SHEEC/sheec_1000_1899.html	1000	1899
Europa	SHARE Erdbebenkatalog für Europa (SHEEC) 1900-2006	https://www.gfz.de/sheec/	1900	2006

In aanvulling hierop zijn de aardbevingen die op de Noordzee zijn geregistreerd van belang voor alle mogelijke locaties van de kerncentrales. In het recente Europese project SHARP (Stress history and reservoir pressure for improved quantification of CO₂ storage containment risks) zijn de aardbevingscatalogi van de landen rond de Noordzee naast elkaar gelegd. Dubbelingen van dezelfde aardbeving die door meerdere seismologische instituten zijn geregistreerd zijn uit de database gehaald. Het resultaat is weergegeven in Figuur 3 (Kettlety et al, 2024). Hieruit blijkt duidelijk dat er een ruimtelijk verschil is in de detecteerbaarheid. Bovendien is er meer seismiciteit in de centrale Graben en in de Viking Graben.



Figuur 3. Kaart met de SHARP seismische event catalogus. De grootte van het symbool geeft de lokale magnitude (M_L) weer. De kleurschaal loopt van 1980 tot 2020. Uit Kettlety et al. (2024).

2.3 Aardbevingen op of nabij mogelijke locaties

Aardbevingen kunnen een natuurlijke (tektonische) of een geïnduceerde oorsprong hebben. Geïnduceerde aardbevingen worden veroorzaakt door menselijk handelen in de ondergrond. Eemshaven ligt in het gebied waar jarenlang geïnduceerde aardbevingen zijn opgetreden als gevolg van de gaswinning uit het Groningen gasveld. De sterkste aardbeving vond plaats op 16 augustus 2012 in Huizinge en had een lokale magnitude van 3,6. Ook nu de gaswinning gestopt is, treden er nog aardbevingen op. Tot en met 14 maart 2025 zijn er 1648 aardbevingen geregistreerd die gerelateerd zijn aan het gasveld. Voor de geïnduceerde seismiteit in Groningen is een voor deze regio specifieke seismische dreigingsanalyse uitgevoerd. Deze is beschreven in § 3.2.

Voor de locatie Terneuzen zijn de aardbevingen nabij Antwerpen relevant. Dit zijn natuurlijke aardbevingen. Deze zijn samengevat in Tabel 2.

Tabel 2. Aardbevingen in de KNMI catalogus binnen ca. 70 km van Terneuzen. De magnitude is gegeven als lokale magnitude M_L .

Datum JJJMMDD	Tijd uu:mm:ss	Locatie	Lat (N)	Lon (E)	Diepte (km)	M_L
19210519	02:41:00	Galmaarden (België)	50.77	3.95	15	4
19330323	18:48:13.14	Middelkerke (België)	51.122	2.863	10	4.7
19380611	10:57:37	Ronse (België)	50.73	3.62	19	5.6
19380611	13:09:06.79	Maarkedal (België)	50.78	3.58	10	4
19380612	13:25:40.00	Maarkedal (België)	50.78	3.58	10	4.5
19880615	03:02:43.06	Rilland (Nederland)	51.384	4.260	3.1	2.1
20010801	01:08:05.90	Wuustwezel (België)	51.402	4.648	5.4	1.8
20080214	09:29:35.01	Beveren (België)	51.287	4.240	1.9	1.9
20080214	09:51:46.17	Beveren (België)	51.288	4.218	3.4	2.3

Voor Maasvlakte 2 en Terneuzen zijn ook de natuurlijke aardbevingen op de Noordzee relevant. De aardbevingen met een magnitude groter dan 4 en binnen ca. 300 km uit de SHARP catalogus zijn samengevat in Tabel 3. Voor Eemshaven zijn deze samengevat in Tabel 4.

Tabel 3. Aardbevingen uit de Noordzee catalogus met magnitude > 4 en binnen ca. 300 km van Terneuzen en Maasvlakte 2. Bron: SHARP.

Datum	Latitude	Longitude	Diepte (km)	ML	Mw	Origin ID	Bron catalogus
21-05-1382	51.239	1.766	0	5.8	5.7	E2772	ESHM
24-05-1382	51.321	1.655	10	5	4.2	E13E0	ESHM
23-04-1449	51.212	2.3	17	5.3	4	E1DFC	ESHM
06-04-1580	50.991	1.647	11	5.8	5.5	E51DD	ESHM
01-05-1580	51.205	1.088	2	4.4	3.7	E9138	ESHM
28-11-1776	51.138	1.3	20	4.1	4.1	E2259	ESHM
07-06-1931	54.08	1.5	23	5.8	5.8	E7905	ESHM
23-03-1933	51.06	3.03	24.4	4.7	3.7	E925C	ESHM
09-01-1950	51.1	1.9	7	4.4	4	E76EA	ESHM
09-02-1958	53.75	1.01	16	4.4	4.7	F1669	ESHM
29-06-1976	51.1894	5.787	15	4	-	6AE09R1	SHARP
28-04-2007	51.1211	1.1044	5	4.3	4	647A1R1	SHARP
22-05-2015	51.3337	1.3884	17	4.2	4	663C9	ISC

Tabel 4. Aardbevingen uit de Noordzee catalogus met magnitude > 4 en binnen ca. 300 km van Eemshaven. Bron: SHARP.

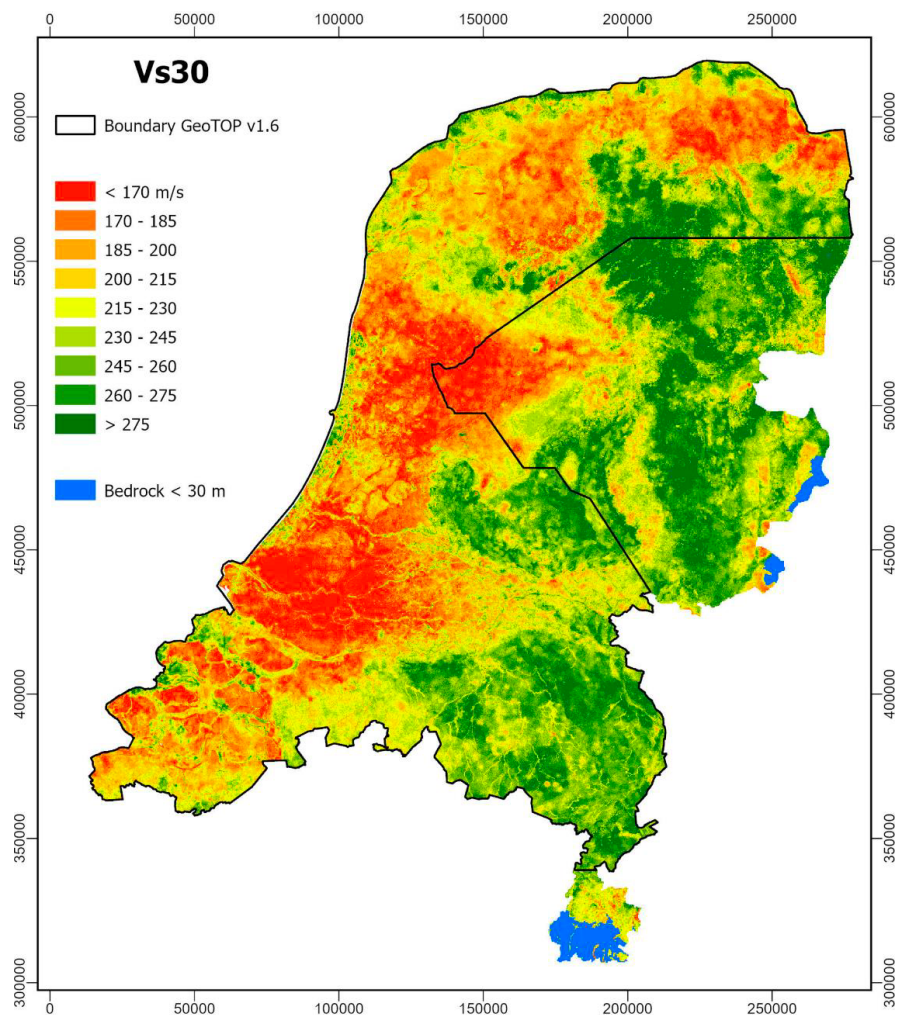
Datum	Latitude	Longitude	Diepte (km)	ML	Mw	Origin ID	Bron catalogus
29-06-1976	51.1894	5.787	15	4	-	6AE09R1	SHARP
07-07-1993	55.5681	4.6788	5	4	-	37CEAR1	SHARP
18-10-1994	55.5011	5.0477	5	4	-	6149CR1	SHARP

In de buurt van Maasvlakte 2 liggen enkele producerende kleine gasvelden. Deze hebben tot nu toe geen geïnduceerde seismiciteit laten zien.

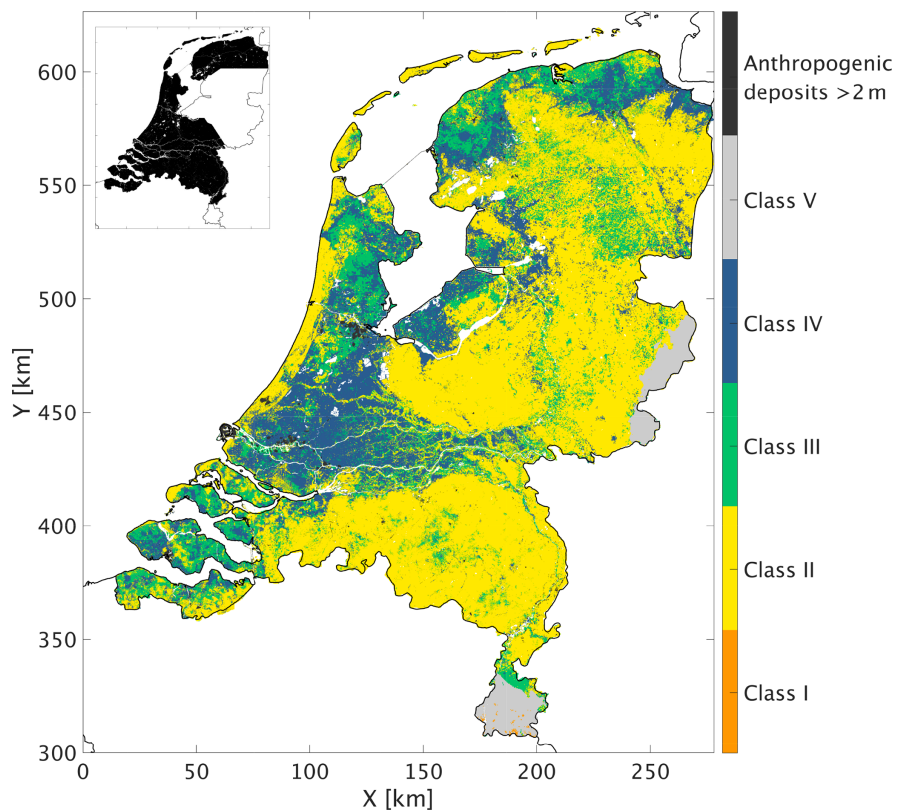
2.4 Overige informatie van belang voor aardbevingen

Het effect van een aardbeving aan of nabij het maaiveld is afhankelijk van de plaats, de diepte, magnitude en van het uitstralingspatroon van de aardbeving en de lokale bodemopbouw. Door de opbouw van de ondiepe ondergrond kan de aardbevingstrilling nabij het aardoppervlak in sterkte toenemen. Dit wordt opslingering of amplificatie genoemd. Dit effect is groter in klei en veen dan in zand. De parameter V_{S30} (tgemiddelde schuifgolfsnelheid in de bovenste 30 m) is een van de indicaties voor de mate van de opslingering beschouwd. In Figuur 4 is de meest recente V_{S30} kaart van TNO Geologische Dienst Nederland weergegeven. Deze kaart is door TNO als proof-of-concept opgesteld. De getalswaarden van V_{S30} op de kaart zijn afgeleid van relaties tussen de schuifgolfsnelheid V_S en grondsoort die gelden voor Groningen. Buiten Groningen zijn de V_{S30} waarden slechts indicatief. Voor Terneuzen en Eemshaven ligt de V_{S30} rond 200 m/s. Maasvlakte 2 valt net buiten de V_{S30} gegevens. Voor de mogelijke locaties is het van belang om lokale V_{S30} informatie te verzamelen, voor zover deze nog niet aanwezig is.

Van Ginkel et al (2022) heeft voor een groot deel van Nederland een amplificatiekaart gemaakt gebaseerd op de lokale ondergrond (Figuur 5). Deze kaart laat een aantal klassen zien. Voor klasse II, III en IV zijn amplificatiewaarden afgeleid (tabel 2 in Van Ginkel et al, 2022). Maasvlakte 2 en Eemshaven bestaan uit opgebracht materiaal met amplificatieklasse VI. Hiervoor zijn geen amplificatiewaarden bepaald vanwege het gebrek aan seismologische data. In de regio Terneuzen zijn klassen II, III en IV aanwezig.



Figuur 4. Gemiddelde indicatieve V_{S30} kaart voor onshore Nederland, afgeleid door TNO Geologische Dienst Nederland (Stafleu et al. 2024). De zwarte lijn geeft aan waar GeoTOP is gebruikt. Daarbuiten is NL3D gebruikt. In de blauwe delen is de bedrock op kleinere dieptes dan 30 m aanwezig.



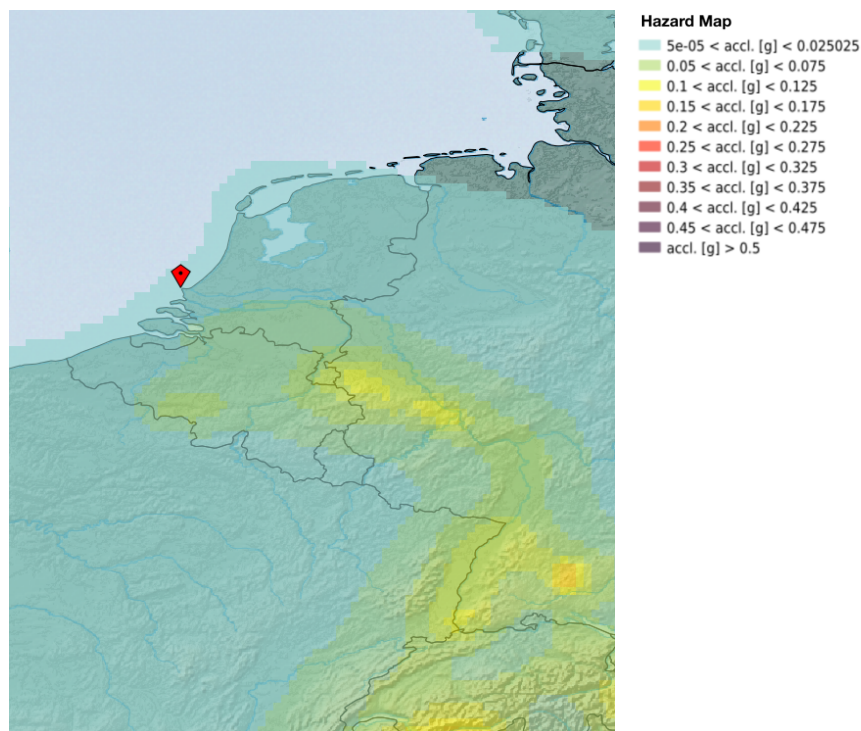
Figuur 5. Amplificatiekaart van Nederland waarbij de kleuren verschillende amplificatieklassen weergeven aan de hand van de lokale ondergrond (van Ginkel et al, 2022). De amplificatie neemt toe van Klasse II via Klasse III naar Klasse IV. Voor Klasse I en V zijn geen amplificatiewaarden afgeleid omdat er onvoldoende data was. Het zwarte deel in de inzet geeft aan waar GeoTOP is gebruikt. Daarbuiten is NL3D gebruikt.

3 Seismische dreiging

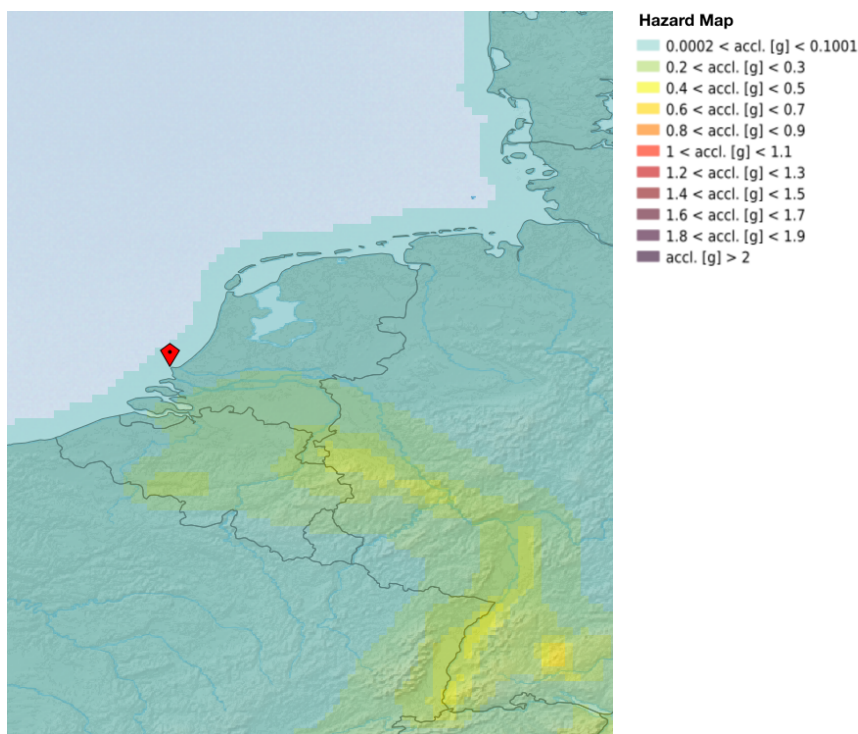
3.1 Zuid-Nederland

In het zuiden van Nederland wordt de seismische dreiging veroorzaakt door de natuurlijke aardbevingen die gerelateerd zijn aan de Roerdalslenk. De beschikbare nationale seismische dreigingskaart dateert uit 1996 (de Crook, 1996) en is gebaseerd op macroseismische intensiteit.

Op Europese schaal is de European Seismic Hazard Model - ESHM20 beschikbaar (Danciu et al, 2021). Dit is een "probabilistic seismic hazard analysis" (PSHA). Deze geeft een indicatie voor de Nederlandse regio. De gemiddelde PGA voor een herhalingsstijd van 476 jaar voor ESHM20 is weergegeven in Figuur 6. De langst beschikbare herhalingsstijd in ESHM20 is 5000 jaar (Figuur 7). Voor overige intensiteitsparameters en herhalingsstijden zijn de databestanden beschikbaar via <http://hazard.efehr.org/en/hazard-data-access/hazard-maps/>.



Figuur 6. ESHM20 kaart van de gemiddelde PGA voor een herhalingsstijd van 476 jaar voor rock condities ($V_{S30} = 800$ m/s). De pin geeft de locatie van Maasvlakte 2 aan. Bron: <http://hazard.efehr.org/en/hazard-data-access/hazard-maps/>. Danciu et al (2021).



Figuur 7. ESHM20 kaart van de gemiddelde PGA voor een herhalingsstijd van 5000 jaar voor rock condities ($V_{S30} = 800$ m/s). De pin geeft de locatie van Maasvlakte 2 aan. Bron: <http://hazard.efehr.org/en/hazard-data-access/hazard-maps/>. Danciu et al (2021).

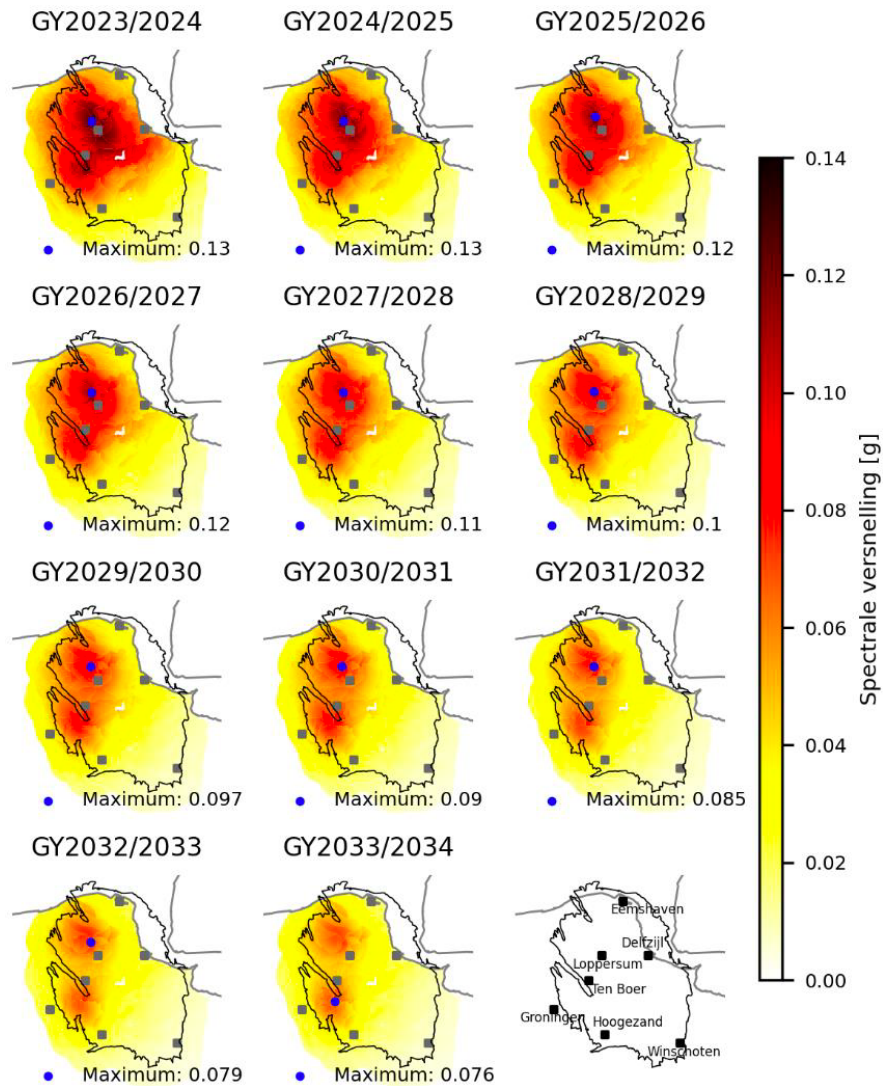
Momenteel wordt er door KNMI een PSHA met een nieuwe seismische dreigingskaart voor Zuid-Nederland gemaakt voor herhalingsstijden van 475 en 2475 jaar. Voor kerncentrales zijn echter langere herhalingsstijden (10.000 jaar) relevant.

3.2 Regio Groningen

Voor de mogelijke locatie Eemshaven zijn de geïnduceerde aardbevingen ten gevolge van de gaswinning in Groningen relevant. Voor de regio Groningen zijn tussen 2013 en 2022 diverse versies van het Ground Motion Model (GMM) afgeleid voor aardbevingen die veroorzaakt zijn door de gaswinning uit het Groningen veld. Iedere versie was een verbetering van de vorige. Deze verbeteringen waren mogelijk doordat er meer gegevens en meer kennis beschikbaar kwamen. De meest recente versie van het GMM is versie 7 (Bommer et al ,2022). Alle onderliggende data zijn beschreven en beschikbaar in Ntinalexix et al (2022).

TNO beheert de modelketen van seismische dreiging en risico voor Groningen. TNO berekende met het winningsscenario, het seismologische bronmodel en het GMM de bijbehorende seismische dreiging. Dit is voor het laatst gedaan in 2023 (Vogelaar et al, 2023). Kaarten met de seismische dreiging voor diverse jaren voor een herhalingsstijd van 475 jaar zijn weergegeven in Figuur 8.

In de berekening van de seismische dreiging van Groningen is gebruik gemaakt van een verdeling aan maximale magnitudes. Deze verdeling is tot stand gekomen gedurende de M_{\max} workshop (NAM, 2022). Het zwaartepunt van de verdeling ligt bij magnitude 4,5. Er is ook rekening gehouden met een zeer kleine kans op getriggerde aardbevingen, waardoor de verdeling doorloopt tot een magnitude van 6,5. De M_{\max} verdeling is opgenomen in Tabel 5.



Figuur 8. Overzicht van de jaarlijkse seismische dreigingskaarten voor gasjaar 2023/2024 tot en met gasjaar 2033/2034 voor een herhalingstijd van 475 jaar, voor scenario 2a (waakvlam productie en sluiting van het Groningenveld per 1 oktober 2024). Bron: Vogelaar et al. (2023).

Tabel 5. M_{max} verdeling voor aardbevingen in Groningen. Bron: NAM, 2022.

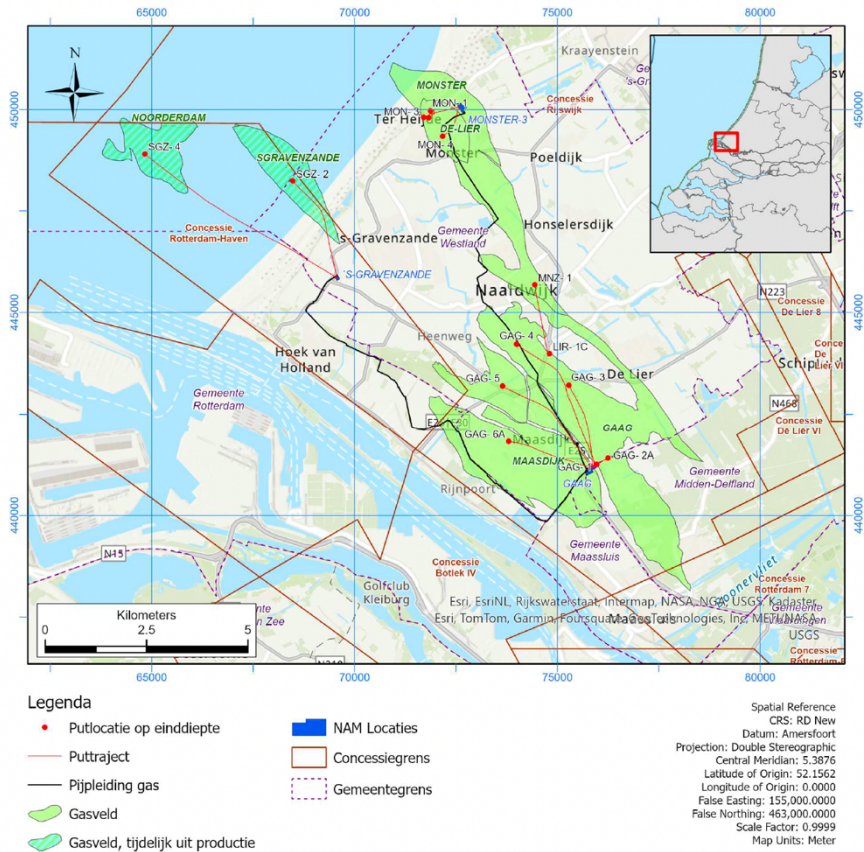
M	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0
Gewicht	0,27	0,405	0,1875	0,1075	0,025	0,005	0

Inmiddels is de gaswinning uit het Groningen gasveld gestopt. Voor deze situatie is er nog geen nieuwe seismische dreigingskaart berekend. Ook is de seismische dreiging niet voor langere herhalingstijden doorgerekend.

3.3 Regio Maasvlakte 2

In de regio Maasvlakte 2 zijn enkele kleine gasvelden aanwezig (Figuur 9). Bij de vergunningaanvraag voor de gaswinning uit deze velden heeft NAM een Seismische Risico Analyse uitgevoerd (NAM, 2024) conform de door SodM opgestelde Methodiek voor risicoanalyse omtrent geïnduceerde bevingen door gaswinning (SodM, 2016). Deze gasvelden hebben tot nu toe geen seismiteit laten zien. De seismische

risicoanalyse van de NAM laat zien dat de Maasdijk, 's-Gravenzande, Noorderdam en de Lier voorkomens in categorie I vallen. De Gaag en Monster voorkomens vallen in categorie II. Ook heeft NAM de theoretisch maximale magnitude bepaald van een aardbeving als alle energie in één aardbeving vrij zou komen, M_{max} . De maximale magnitude is berekend met twee verschillende methodes en weergegeven in Tabel 6.



Figuur 9. Ligging van de gasvelden van NAM nabij Maasvlakte 2. Bron: NAM, 2024.

Tabel 6. M_{max} waarden en risicocategorieën voor de kleine gasvelden nabij Maasvlakte 2 (bron: NAM, 2024).

Voorkomen (gasveld)	M_{max} o.b.v. energiebalans	M_{max} o.b.v. breukslip	Risicocategorie
De Lier	1,8	2,8	I
Maasdijk	2,7	3,7	I
Gaag	3,3	3,9	II
Monster	3,1	4,0	II
's-Gravenzande	2,8	3,8	I
Noorderdam	2,6	3,0	I

3.4 Aanbevelingen

Bij een nieuwe kerncentrale wordt voor de seismische dreiging uitgegaan van langere herhalingsstijden dan voor bijvoorbeeld gewone woningen. Een herhalingsstijd van 10.000 jaar is gebruikelijk voor kerncentrales. Bovendien dient er te worden uitgegaan van locatiespecifieke omstandigheden en niet van regionale modellen.

Omdat er in de afleiding van seismische dreiging veel aannames en keuzes moeten worden gemaakt, wordt internationaal de locatiespecifieke seismische dreiging ter plaatse van de uiteindelijke locaties van de kerncentrales vaak bepaald met een SSHAC-proces. SSHAC staat voor Senior Seismic Hazard Analysis Committee, het comité dat aanbevelingen heeft gedaan over probabilistische seismische dreigingsanalyse.

Het SSHAC-proces is gestructureerd raamwerk en procedure om met meerdere experts de onzekerheden in de input voor de dreigingsanalyse te bepalen. De Nuclear Regulatory Commission van de Verenigde Staten (USNRC) publiceerde in 1997 de NUREG/CR-6372, met de titel "Recommendations for Probabilistic Seismic Hazard Analysis: Guidance on Uncertainty and the Use of Experts" (USNRC, 1997). Dit document was het resultaat van vier jaar overleg door het Senior Seismic Hazard Analysis Committee (SSHAC). Zij hadden zich gebogen over de vraag hoe onzekerheden in probabilistische seismische dreigingsanalyse moeten worden meegenomen uitgaande van de kennis van deskundigen. De NUREG/CR-6372 beschrijft het formele proces voor het structureren en uitvoeren van beoordelingen door experts. Dit proces staat bekend als het "SSHAC-proces". Dit proces kan doorlopen worden op vier niveaus. De SSHAC-richtlijnen zijn in 2012 bijgewerkt met praktische implementatierichtlijnen voor SSHAC-studies op niveau 3 en 4 (USNRC, 2012). In 2018 zijn bijgewerkte implementatierichtlijnen gepubliceerd (USNRC, 2018). Dit laatste document biedt de meest complete en praktische toepassing van de SSHAC-richtlijnen en is in deze sectie samengevat.

Het doel van het SSHAC-proces is om een goed gedocumenteerde analyse te maken waarin de gemiddelde en de range van de technisch verdedigbare interpretaties van de seismische dreiging¹ gevat worden via gestructureerde interactie tussen experts. Het SSHAC-proces omvat vijf kernelementen, die allemaal aanwezig moeten zijn.

De vijf kernelementen van het SSHAC-proces zijn:

1. Duidelijk gedefinieerde rollen voor alle deelnemers
2. Objectieve evaluatie van alle beschikbare gegevens, modellen en methoden die relevant kunnen zijn voor de dreiging op de locatie.
3. Integratie van de uitkomst van het evaluatieproces in modellen die de beste schatting van de input voor de PSHA en de bijbehorende onzekerheid weergeven.
4. Documentatie met voldoende details om de PSHA te kunnen reproduceren.
5. Onafhankelijke en participatieve peer-review gedurende alle fases van het proces.

Er zijn vier niveaus binnen het SSHAC-proces, van het eenvoudigste (niveau 1) tot het meest complexe en veeleisende (niveau 4). Het SSHAC-niveau definieert het detailniveau en het aantal betrokken experts. Een belangrijk criterium bij het selecteren van het SSHAC-niveau voor een PSHA is de mate waarin wettelijke zekerheid vereist is. De kenmerken van elk SSHAC-niveau worden beschreven in hoofdstuk 3 van NRC, 2018. De kenmerken van en de verschillen tussen de SSHAC-niveaus met illustratieve figuren zijn opgenomen in bijlage 3.

¹ center, body, and range of technically defensible interpretations, commonly referred to as the CBR of TDI.

4 Klimatologische gegevens

Dit hoofdstuk geeft klimatologische informatie voor de locaties Terneuzen, Maasvlakte-2 en Eemshaven. Om herhalingstijden zo goed mogelijk te kunnen schatten zijn waar mogelijk lange reeksen gebruikt. Voor Terneuzen is KNMI-station Vlissingen (vanaf 1906) gebruikt, op 21 km van Vlissingen. Station Westdorpe ligt iets dichterbij, maar de metingen beginnen hier pas in 1991. Voor Maasvlakte-2 is KNMI-station Hoek van Holland gebruikt, op 10 km afstand. Dit station heeft metingen vanaf 1971, met een gat tussen 1981 en 1990. Voor Eemshaven is station Eelde gebruikt, op 39 km van Eemshaven. Station Eelde heeft metingen vanaf 1906. Daarnaast is, met het oog op de locatie nabij de Waddenzee, voor de windgegevens in §4.2 ook station Lauwersoog gebruikt, op 42 km van Eemshaven. Station Lauwersoog heeft metingen vanaf 1991. De ligging van de KNMI-stations is weergegeven in Figuur 1.

Alle gebruikte data zijn beschikbaar via <https://daggegevens.knmi.nl/>.

4.1 Klimatologische gegevens voor de periode 2015-2024

De klimatologische gegevens met betrekking tot temperatuur, vochtigheid, druk en wind zijn opgenomen in Tabel 7.

Tabel 7. Meteorologische gegevens voor de periode 2015-2024. Betekenis afkortingen: TG: etmaalgemiddelde temperatuur; TX: maximumtemperatuur, oftewel de hoogste temperatuur van het etmaal; TN: minimumtemperatuur, oftewel de laagste temperatuur van het etmaal; UG: etmaalgemiddelde relatieve vochtigheid; PG: etmaalgemiddelde oppervlaktedruk herleid tot zeeniveau; RH: etmaalsom van de neerslag; FG: etmaalgemiddelde windsnelheid; FHX: hoogste uurgemiddelde wind van het etmaal; FXX: hoogste windstoot van het etmaal.

	Vlissingen	Hoek van Holland	Eelde
TG, gemiddelde	12,0 °C	11,8 °C	10,5 °C
TG, hoogste waarde	27,9 °C	30,3 °C	28,3 °C
TG, laagste waarde	-4,5 °C	-5,8 °C	-7,8 °C
TX, gemiddelde	14,8 °C	15,0 °C	14,7 °C
TX, hoogste waarde	37,3 °C	38,9 °C	36,9 °C
TX, laagste waarde	-3,0 °C	-3,7 °C	-5,4 °C
TN, gemiddelde	9,4 °C	8,6 °C	5,9 °C
TN, hoogste waarde	22,2 °C	21,2 °C	21,5 °C
TN, laagste waarde	-6,2 °C	-8,0 °C	-12,6 °C
UG, gemiddelde	79 %	79 %	82 %
UG, hoogste waarde	100 %	100 %	100 %
UG, laagste waarde	43 %	34 %	42 %
PG, gemiddelde	1016 hPa	1016 hPa	1015 hPa
PG, hoogste waarde	1047 hPa	1047 hPa	1046 hPa
PG, laagste waarde	972 hPa	972 hPa	974 hPa
RH, gemiddelde jaarsom	797 mm	903 mm	813 mm
RH, hoogste waarde	78 mm	46 mm	47 mm
FG, gemiddeld	6,2 m/s	7,0 m/s	4,0 m/s
FG, hoogste waarde	18,0 m/s	17,8 m/s	12,3 m/s
FHX, hoogste waarde	28 m/s	30 m/s	21 m/s
FXX, hoogste waarde	39 m/s	40 m/s	34 m/s

4.2 Winddata per seizoen

De waarden per seizoen zijn bepaald van vier wind-variabelen die invloed hebben op de golfhoogte. Deze zijn opgenomen in Tabel 8.

Tabel 8. Klimatologische gegevens voor de periode 2015-2024 van enkele grootheden die invloed hebben op de golfhoogte, in de winter (december, januari, februari), lente (maart, april, mei), zomer (juni, juli, augustus) en herfst (september, oktober, november). Betekenis van de afkortingen: FG: etmaalgemiddelde windsnelheid; FHX: hoogste uurgemiddelde wind van het etmaal; FXX: hoogste windstoot van het etmaal.

		Vlissingen	Hoek van Holland	Eelde	Lauwersoog
FG, gemiddelde	Winter	7,3 m/s	8,0 m/s	4,8 m/s	6,8 m/s
	Lente	5,9 m/s	6,8 m/s	4,0 m/s	6,5 m/s
	Zomer	5,5 m/s	6,2 m/s	3,4 m/s	5,7 m/s
	Herfst	6,1 m/s	7,0 m/s	3,7m/s	5,8 m/s
FG, hoogste waarde	Winter	17,5 m/s	17,8 m/s	12,3 m/s	18,2 m/s
	Lente	16,7 m/s	17,3 m/s	11,7 m/s	17,7 m/s
	Zomer	14,7 m/s	15,0 m/s	9,7 m/s	13,2 m/s
	Herfst	18,0 m/s	16,1 m/s	9,7 m/s	16,8 m/s
FHX, hoogste waarde	Winter	28 m/s	30 m/s	21 m/s	23 m/s
	Lente	23 m/s	21 m/s	17 m/s	23 m/s
	Zomer	22 m/s	22 m/s	16 m/s	22 m/s
	Herfst	23 m/s	23 m/s	17 m/s	22 m/s
FXX, hoogste waarde	Winter	39 m/s	40 m/s	34 m/s	34 m/s
	Lente	34 m/s	37 m/s	28 m/s	31 m/s
	Zomer	29 m/s	30 m/s	27 m/s	30 m/s
	Herfst	32 m/s	33 m/s	26 m/s	33 m/s

De statistiek van extreme zeewaterstand en wind op basis van meetgegevens en modelsimulaties staan beschreven in KNMI rapportage TR-406 (de Valk en van der Brink, 2023). Voor de uurgemiddelde windsnelheid vinden zijn bij een herhalingstijd van 10.000 jaar een terugkeerwaarde (met standaardafwijking) van 33,9 (0,8) m/s in Hoek van Holland.

4.3 Klimatologische gegevens voor de periode 2021-2024

Tijdreeksen van meteorologische variabelen, waaronder de temperatuur, neerslag, windsnelheid en-richting zijn beschikbaar via <https://daggegevens.knmi.nl/>. Enkele samenvattende data zijn opgenomen in Tabel 9.

Tabel 9. Meteorologische gegevens voor de periode 2021-2024. Betekenis van de afkortingen: TG: etmaalgemiddelde temperatuur; TX: maximumtemperatuur, oftewel de hoogste temperatuur van het etmaal; TN: minimumtemperatuur, oftewel de laagste temperatuur van het etmaal; RH: etmaalsom van de neerslag; FG: etmaalgemiddelde windsnelheid; DDVEC: Vectorgemiddelde windrichting in graden (0=noord, 90=oost, enzovoorts); FHX: hoogste uurgemiddelde wind van het etmaal; FXX: hoogste windstoot van het etmaal.

	Vlissingen	Hoek van Holland	Eelde
TG, gemiddelde	12,1 °C	11,9 °C	12,1 °C
TX, hoogste waarde	34,2 °C	38,5 °C	35,6 °C
TN, laagste waarde	-5,5 °C	-7,4 °C	-12,6 °C
RH, gemiddelde jaarsom	817 mm	921 mm	822 mm
RH, hoogste waarde	78 mm	44 mm	31 mm
FG, gemiddelde	6,3 m/s	6,9 m/s	4,0 m/s
DDVEC, gemiddelde	235	245	230
FG, hoogste waarde	17,6 m/s	17,8 m/s	12,3 m/s
FHX, hoogste waarde	28 m/s	24 m/s	21 m/s
FXX, hoogste waarde	38 m/s	39 m/s	34 m/s

4.4 Herhalingstijden

Voor vier temperatuurvariabelen zijn de waarden bepaald met herhalingstijden tot 10.000 jaar. Het betreft de jaarmaxima van de dagelijkse maximumtemperatuur, en van de 1-, 7- en 30-daags gemiddelde temperatuur. Dit is gedaan voor de KNMI-stations Vlissingen en Eelde, waarvoor een relatief lange meetreeks sinds 1906 beschikbaar is. De herhalingstijden zijn berekend door uit de waargenomen jaarmaxima een GEV (Gegeneraliseerde extreme waarde verdeling) te schatten. De herhalingstijden gelden voor het huidige klimaat (2024), waarbij de jaarmaxima gecorrigeerd zijn voor de toename in de wereldgemiddelde temperatuur. De resultaten zijn opgenomen in Tabel 10 tot en met Tabel 13. Bijvoorbeeld, in Vlissingen ligt de hoogste maximumtemperatuur van het jaar die een keer per 10.000 jaar voorkomt met 95% kans tussen de 38,6 en 46,6 °C, met 41,7 °C als meest waarschijnlijke waarde.

Tabel 10. Waarden van de hoogste maximumtemperatuur van het jaar voor gegeven herhalings tijden, met onder- en bovengrens van het 95% betrouwbaarheidsinterval, voor het jaar 2024.

Herhalings-tijd (jaar)	Vlissingen			Eelde		
	Waarde (°C)	Onder-grens (°C)	Boven-grens (°C)	Waarde (°C)	Onder-grens (°C)	Boven-grens (°C)
10	35,1	33,8	36,3	36,5	35,7	37,3
20	36,1	34,7	37,4	37,2	36,2	38,0
50	37,3	36,0	38,9	37,9	36,7	38,8
100	38,1	36,3	40,0	38,2	36,9	39,3
200	38,8	36,9	41,0	38,6	37,1	39,7
500	39,7	37,5	42,4	38,9	37,3	40,2
1000	40,2	37,9	43,3	39,1	37,3	40,5
2000	40,7	38,2	44,3	39,3	37,4	40,7
5000	41,3	38,4	45,6	39,5	37,4	41,0
10000	41,7	38,6	46,6	39,6	37,4	41,2

Tabel 11. Waarden van de hoogste etmaalgemiddelde temperatuur van het jaar voor gegeven herhalings tijden, met onder- en bovengrens van het 95% betrouwbaarheidsinterval, voor het jaar 2024.

Herhalings-tijd (jaar)	Vlissingen			Eelde		
	Waarde (°C)	Onder-grens (°C)	Boven-grens (°C)	waarde (°C)	Onder-grens (°C)	Boven-grens (°C)
10	27,0	26,2	27,8	27,7	26,9	28,4
20	27,7	26,8	28,4	28,3	27,4	29,0
50	28,4	27,4	29,1	28,8	27,8	29,6
100	28,9	27,7	29,6	29,1	28,1	30,1
200	29,0	28,0	30,1	29,4	28,3	30,5
500	29,4	28,3	30,7	29,7	28,5	30,9
1000	29,7	28,4	31,2	29,9	28,6	31,2
2000	29,9	28,5	31,6	30,0	28,7	31,4
5000	30,1	28,6	32,1	30,2	28,7	31,8
10000	30,2	28,7	32,5	30,3	28,8	32,0

Tabel 12. Waarden van de hoogste 7-daags gemiddelde temperatuur van het jaar voor gegeven herhalings tijden, met onder- en bovengrens van het 95% betrouwbaarheidsinterval, voor het jaar 2024.

Herhalings-tijd (jaar)	Vlissingen			Eelde		
	Waarde (°C)	Onder-grens (°C)	Boven-grens (°C)	Waarde (°C)	Onder-grens (°C)	Boven-grens (°C)
10	24,4	23,6	25,0	24,5	23,6	25,3
20	25,0	24,2	25,7	25,2	24,3	26,1
50	25,9	24,8	26,6	26,1	25,1	27,1
100	26,5	25,2	27,2	26,6	25,6	27,8
200	26,7	25,4	27,9	27,2	26,0	28,5
500	27,2	25,7	28,7	27,8	26,3	29,5
1000	27,6	25,9	29,3	28,2	26,5	30,1
2000	27,9	26,0	29,8	28,5	26,7	30,8
5000	28,3	26,2	30,5	28,9	26,9	31,6
10000	28,5	26,2	31,0	29,2	27,0	32,2

Tabel 13. Waarden van de hoogste 30-daags gemiddelde temperatuur van het jaar voor gegeven herhalings tijden, met onder- en bovengrens van het 95% betrouwbaarheidsinterval, voor het jaar 2024.

Herhalings-tijd (jaar)	Vlissingen			Eelde		
	Waarde (°C)	Onder-grens (°C)	Boven-grens (°C)	Waarde (°C)	Onder-grens (°C)	Boven-grens (°C)
10	21,9	21,3	22,5	21,1	20,6	21,7
20	22,5	21,7	23,1	21,7	21,1	22,3
50	23,2	22,2	24,0	22,3	21,6	23,0
100	23,8	22,5	24,7	22,7	21,8	23,6
200	24,0	22,7	25,3	23,1	22,1	24,2
500	24,5	22,9	26,1	23,5	22,3	24,9
1000	24,8	23,0	26,8	23,8	22,4	25,4
2000	25,1	23,2	27,5	24,0	22,5	26,0
5000	25,5	23,3	28,4	24,3	22,6	26,6
10000	25,7	23,3	29,1	24,5	22,6	27,0

4.5 Toekomstig klimaat

Door de toename van de hoeveelheid broeikasgassen in de atmosfeer stijgt wereldwijd de temperatuur. In Nederland is de opwarming tot nu toe ongeveer twee keer zo groot als de wereldgemiddelde opwarming. Volgens de KNMI'23-klimaatscenario's (KNMI, 2023) neemt ten opzichte van de periode 1991-2020 de jaargemiddelde temperatuur rond 2050 toe met 0,9 tot 1,6°C en rond 2100 met 0,9 tot 4,4°C. De onzekerheid in de opwarming komt vooral door onzekerheid in de hoeveelheid broeikasgassen die nog wordt uitgestoten, en voor een deel door onzekerheid in de mate waarin de temperatuur toeneemt bij een gegeven toename van de hoeveelheid broeikasgassen. De ruimtelijke verschillen in de opwarming binnen Nederland zijn klein. Voor de jaar- en seizoengemiddelde windsnelheid wordt niet of nauwelijks een verandering verwacht. Wel neemt de kans op post-tropische cyclonen toe en kunnen windstoten en valwinden bij buien sterker worden.

Bijlage 1 – Referenties

van den Berg M., Vanneste K., Dost B., Lokhorst A., van Eijk M., Verbeeck K. (2002). Paleoseismic investigations along the Peel Boundary Fault: geological setting, site selection and trenching results. *Netherlands Journal of Geosciences - Geologie en Mijnbouw*, 81(1), 39-60. doi:10.1017/S0016774600020552

BGS website aardbevingen:

<https://www.earthquakes.bgs.ac.uk/earthquakes/dataSearch.html>. Laatst geraadpleegd op 14 maart 2025.

Bommer, J.J., Stafford, P.J., Ruigrok, E., Rodriguez-Marek, A., Ntinalexis, M., Kruiver, P.P., Edwards, B., Dost B., van Elk, J. (2022). Ground-motion prediction models for induced earthquakes in the Groningen gas field, the Netherlands. *J Seismol* 26, 1157–1184. <https://doi.org/10.1007/s10950-022-10120-w>

De Crook, T. (1996). A seismic zoning map conforming to Eurocode 8, and practical earthquake parameter relations for the Netherlands. *Netherlands Journal of Geosciences*, 11-18.

Danciu L., Nandan S., Reyes C., Basili R., Weatherill G., Beauval C., Rovida A., Vilanova S., Sesetyan K., Bard P-Y., Cotton F., Wiemer S., Giardini D. (2021). The 2020 update of the European Seismic Hazard Model: Model Overview, <https://doi.org/10.12686/a15>, EFEHR Technical Report 001

ESHM20 hazard map: <http://hazard.efehr.org/en/hazard-data-access/hazard-maps/> Laatst geraadpleegd op 24 april 2025.

van Ginkel, J., Ruigrok, E., Stafleu, J., Herber, R. (2022). Development of a seismic site-response zonation map for the Netherlands. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(1), 41-63. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-41-2022>

Houtgast, G. (1991). Aardbevingen in Nederland, catalogus van aardbevingen t/m 1990. KNMI publication 179, 166pp

Kettlely, T., Martuganova, E., Kühn, D., Schweitzer, J., Weemstra, C., Baptie, B., Dahl-Jensen, T., Jerkins, A., Voss, P.H., Kendall, M., JSkurtveit, E. (2024). A unified earthquake catalogue for the North Sea to derisk European CCS operations. *First Break*, 42(5), 31-36. DOI: 10.3997/1365-2397.fb2024036

KNMI (1993). Netherlands Seismic and Acoustic Network. Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI). Other/Seismic Network. DOI: 10.21944/e970fd34-23b9-3411-b366-e4f72877d2c5

KNMI (2015). Royal Netherlands Meteorological Institute Event Catalog. Other/Earthquake Catalog. DOI: 10.21944/ef5j-rz10

KNMI (2023). KNMI'23-klimaatscenario's voor Nederland, KNMI, De Bilt, KNMI-Publicatie 23-03, [KNMI'23 Klimaatscenario's voor Nederland](#)

KNMI Continue golfvormen FDSN Webservices:

<https://rdsa.knmi.nl/fdsnws/dataselect/1/>. Laatst geraadpleegd op 14 maart 2025.

KNMI Events FDSN Webservices: <https://rdsa.knmi.nl/fdsnws/event/1/>. Laatst geraadpleegd op 14 maart 2025.

KNMI Klimatologische gegevens: <https://daggegevens.knmi.nl/https://daggegevens.knmi.nl/>. Laatst geraadpleegd op 20 maart 2025.

KNMI Website aardbevingen: <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/dataset/aardbevingscatalogus>. Laatst geraadpleegd op 14 maart 2025.

NAM (2022). Full report on the Second Groningen Mmax Workshop, 1222 pp.. Beschikbaar op <https://nam-onderzoeksrapporten.data-app.nl/reports/download/groningen/en/fe2d5640-7fbd-477e-8be4-125f66d2260d>. Laatst geraadpleegd op 6 november 2025.

NAM (2024). Aanvraag instemming winningsplan Gaag-Monster. November 2024. Beschikbaar via nlog: <https://www.nlog.nl/field-web/rest/field/document/3987878211>. Laatst geraadpleegd op 6 november 2025.

Ntinalexis, M., Kruiver, P. P., Bommer, J. J., Ruigrok, E., Rodriguez-Marek, A., Edwards, B., Pinho, R., Spetzler, J., Obando Hernandez, E., Pefkos, M., Bahrapouri, M., van Onselen, E.P., Dost, B., van Elk, J. (2022). A database of ground motion recordings, site profiles, and amplification factors from the Groningen gas field in the Netherlands. *Earthquake Spectra*, 39(1), 687-701. <https://doi.org/10.1177/875529302211409>

Qcon (2021) Seismicity in Flanders. Beschikbaar via [https://www.friscris.be/en/publications/seismicity-in-flanders\(a94f7d1a-3fbf-4bb3-b654-d5e56d2a3621\).html](https://www.friscris.be/en/publications/seismicity-in-flanders(a94f7d1a-3fbf-4bb3-b654-d5e56d2a3621).html)

SodM (2016). Methodiek voor risicoanalyse omtrent geïnduceerde bevingen door gaswinning - tijdelijke leidraad voor adressering mbb. 24.1.p, versie 1.2, SodM, 1 februari 2016.

Stafleu, J., D. Kraaijpoel, S. Osinga (2024). Vs30 map of the Netherlands - Update of the proof-of-concept map of 2022. Report TNO 2024 R11542.

USNRC (1997). Recommendations for Probabilistic Seismic Hazard Analysis: Guidance on Uncertainty and Use of Experts: Main Report. NUREG/CR-6372, Volume 1.

USNRC (2012). Practical Implementation Guidelines for SSHAC Level 3 and 4 Hazard Studies. NUREG-2117, Rev. 1

USNRC (2018). Updated Implementation Guidelines for SSHAC Hazard Studies. NUREG-2213.

de Valk, C.F., van den Brink, H.W. (2023). Update van de statistiek van extreme zeewaterstand en wind op basis van meetgegevens en modelsimulaties, rapportnummer TR-406. Beschikbaar via <https://cdn.knmi.nl/knmi/pdf/bibliotheek/knmipubTR/TR406.pdf>

Vogelaar, B., Osinga, S., Aben, F.M., Kraaijpoel, D.A., Pluymaekers, M.P.D., van Driel, W.W. (2023). Publieke Seismische Dreigings- en Risicoanalyse Groningen gasveld 2023. TNO rapportnr. TNO 2023 R10682.

Bijlage 2 – Gereviseerde lijst met historische aardbevingen

Deze lijst met historische aardbevingen is gebaseerd op Houtgast (1991). De lijst is doorlopen en er is beoordeeld welke events waarschijnlijk wel of geen aardbeving zijn. Echte aardbevingen zijn in rood weergegeven. De laatste paar events in deze tabel komen overeen met de eerste aardbevingen in de geïnstrumenteerde aardbevingscatalogus.

Appendix 2 - Revision of Houtgast (1991) earthquake catalogue

Events that were interpreted as true earthquakes are indicated in red.

LOCATION	Land	ID	YYMMDD	Time	Lat (N)	Lon (E)	Intensity	Magnitude	Depth (km)	Comments
Maastricht	NL	10070000000000.000	10070000	000000.00	50.9	5.7				Fake event. Ref to Sieberg (1940), but not in his catalog
Brabant (B)	NL	10810327180000.000	10810327	180000.00	0	0		0.00	0.00	
Luik (B)/ Aken (D)	B	11120103000000.000	11120103	000000.00	0	0		0.00	0.00	
Aken (D)/Luik (B)	NL	11120420000000.000	11120420	000000.00	0	0		0.00	0.00	
Luik (B)	B	11170502000000.000	11170502	000000.00	50.6	5.5		0.00	0.00	probably same event as jan 3 in Italy
Aken (D)	D	11211210040000.000	11211210	040000.00	50.8	6.1		0.00	0.00	
Aken/Herzogenrath (D)	D	11410424000000.000	11410424	000000.00	50.8	6.1		0.00	0.00	
Northsea	NL	11421102000000.000	11421102	000000.00						Felt in Utrecht, but also in Holland. Possible Northsea event
Maastricht	NL	11740000000000.000	11740000	000000.00	50.9	5.7		0.00	0.00	No original sources, fake event
Wierum	NL	12251027060000.000	12251027	060000.00	53.4	6		0.00	0.00	No earthquake, presumably wind related damage
Nederland (Noord-)	NL	12620128000000.000	12620128	000000.00	53.3	6.8		0.00	0.00	No earthquake, presumably wind related damage
Northsea	NL	13420103000000.000	13420103	000000.00	52.1	5.2		0.00	0.00	Felt in Holland, Zeeland and Gent (B), most probable Northsea event
Holland	NL	13460102000000.000	13460102	000000.00	0	0		0.00	0.00	same event as 1342, wrong date
Nederland/ Duitsland	NL	13500000000000.000	13500000	000000.00	0	0		0.00	0.00	probably related to large Swiss event (Villach)
Street of Dover (North sea)	GB	13820521130000.000	13820521	130000.00	51.3	2.0	VII	6.00	5.00	Street of Dover, North sea (Melville et al., 1996)
Maastricht	NL	13850000000000.000	13850000	000000.00	50.9	5.7	VI-VII	0.00	0.00	Alexandre (1994): wrong copy of event in Liege
Maastricht	NL	13930611000000.000	13930611	000000.00	50.9	5.7	VI-VII	0.00	0.00	Alexandre (1994): refers to 1395 event
Julich (D)	D	13950611030000.000	13950611	030000.00	50.9	6.4	IV-V	0.00	0.00	Felt in Koln & Liege (Alexandre, 1994)
Nederland	NL	14120000000000.000	14120000	000000.00	0	0		0.00	0.00	No sources, only mentioned by Lorie, fake event
North sea	B	14490423040000.000	14490423	040000.00	51.6	2.5		5.50	0.00	North sea (Melville (1996)
Luik (B)	B	14560826020000.000	14560826	020000.00	50.6	5.6		0.00	0.00	small event, felt around Liege (Alexandre, 1994)
Maastricht	NL	15040514000000.000	15040514	000000.00	50.9	5.7	IV	0.00	0.00	Only one unreliable source (Eversen- see Alexandre, 1994)
Aken (D)	D	15040823233000.000	15040823	233000.00	50.8	6.2	VII	5.00	0.00	
Maastricht	NL	15050601000000.000	15050601	000000.00	50.9	5.7	IV	0.00	0.00	Only one unreliable source (Eversen- see Alexandre, 1994)
Venlo	NL	15310712000000.000	15310712	000000.00	51.3	6.2	VII	0.00	0.00	1531/32; date unsure, location also unsure
Weert	NL	15540322000000.000	15540321	000000.00	51.3	5.7	VII	5.00	0.00	Felt in Weert, Geleen, Erkelenz, Liege, Antwerp; location?
Weert	NL	15540430000000.000	15540321	170000.00	0	0	VII	0.00	0.00	Felt in Weert
Weert	NL	15540514150000.000	15540514	150000.00						Felt in Weert
Weert	NL	15630228140000.000	15630228	140000.00	51.3	5.7	II	0.00	0.00	?
Boxmeer	NL	15630321000000.000	15630321	000000.00	51.65	5.95		0.00	0.00	same as 1554
Weert, Hoofdschok	NL	15630322000100.000	15630322	000100.00	51.3	5.7	VI	0.00	0.00	Same event as 1554
Weert	NL	15630430000000.000	15630430	000000.00	51.3	5.7		0.00	0.00	1554
Weert	NL	15630515000000.000	15630515	000000.00	51.3	5.7		0.00	0.00	source not specific
Weert	NL	15660000000000.000	15660000	000000.00	51.3	5.7		0.00	0.00	source not specific
Montfort (??)	B	15660000000000.000	15660000	000000.00	51.1	5.6		0.00	0.00	source not specific
Weert	NL	15680900000000.000	15680900	000000.00	51.3	5.7		0.00	0.00	?
Belgie	NL	15690514000000.000	15690514	000000.00	0	0		0.00	0.00	felt in Weert, Geleen, Erkelenz, Liege, same date as 1554?
Street of Dover (North sea)	GB	15800406180000.000	15800406	180000.00	51	1.5	VIII	6.00	10.00	Melville et al. (1996)
Canterbury (GB)	GB	15800501000000.000	15800501	000000.00	51.2	1.1	VI	5.00	0.00	
Boxmeer	NL	15810310000000.000	15810310	000000.00	51.6	5.9	VI	0.00	0.00	
Maastricht	NL	15830000000000.000	15830000	000000.00	50.9	5.7	II	0.00	0.00	
Zwitserland	CH	16010908010000.000	16010908	010000.00	0	0	VIII	0.00	0.00	
Nederland	NL	16020102114500.000	16020102	114500.00	0	0		0.00	0.00	

LOCATION	Land	ID	YYMMDD	Time	Lat (N)	Lon (E)	Intensity	Magnitude	Depth (km)	Comments
Aken (D)	D	16400404033000.000	16400404	033000.00	50.8	6.2	VII	5.50	0.00	ORB-solution
Holland	NL	1642040000000.000	16420400	000000.00	0	0		0.00	0.00	Perrey, wsch 1640 event
Nederland	NL	1652000000000.000	16520000	000000.00	0	0		0.00	0.00	Genoemd door Lorie, geen bronnen. Vermeld bij Mobachius (1756)
Maastricht	NL	16630519180000.000	16630519	180000.00	50.9	5.7	V	0.00	0.00	Sieberg (1940), no reliable sources
Nederland	NL	1665000000000.000	16650000	000000.00	0	0		0.00	0.00	Lorie (1903), no sources
Zeeland	NL	16870519000000.000	16870519	000000.00	51.5	4	III	0.00	0.00	Rummelen, no sources in Netherlands
Verviers (B)	B	16920918143000.000	16920918	143000.00	50.59	5.86	VIII	6.30	0.00	Alexandre et al (2008)+pers. comm ORB
Vlaanderen (B), Hoofdschok	B	16930109000000.000	16930109	000000.00	51	3.5		0.00	0.00	fake, maybe 1692 event
Aix-la-chapelle (D)	D	16901218173000.000	16901218	173000.00	#####	6.1	VI	4.60	n	AHEAD
Maastricht	NL	16940322140000.000	16940322	140000.00	50.9	5.7	III	0.00	0.00	
Roermond/ Maastricht	NL	16990422000000.000	16990422	000000.00	51.1	5.9	VI-VII	4.00	0.00	?
Roermond, Hoofdschok	NL	16990622000000.000	16990622	000000.00	51.1	5.9	III	0.00	0.00	
Maastricht, Hoofdschok	NL	16990624000000.000	16990624	000000.00	50.9	5.7	II	0.00	0.00	
Maastricht	NL	16990724000000.000	16990724	000000.00	50.9	5.7	II	0.00	0.00	
Bergen op Zoom	NL	17110517000000.000	17110517	000000.00	51.5	4.3	II	0.00	0.00	
Tienen (B)	B	17140113220000.000	17140113	220000.00	50.8	4.8	VII	4.50	5.00	
Maastricht	NL	17140528000000.000	17140528	000000.00	50.9	5.7	II	0.00	0.00	
Keulen (D)	D	17550218070000.000	17550218	070000.00	50.9	6.9		0.00	0.00	
Helmond, Hoofdschok	NL	17550400000000.000	17550400	000000.00	51.5	5.7	III	0.00	0.00	
Maastricht	NL	17551218000000.000	17551218	000000.00	50.9	5.7	VII	0.00	0.00	
Aken (D)	D	17551227003000.000	17551226	003000.00	50.86	6.311	VII	5.10	n	Meidow (1995), AHEAD
Aken (D)	D	17551226160000.000	17551226	160000.00	50.8	6.3	VI-VII	4.80	n	Meidow (1995), AHEAD
Utrecht (prov.)	NL	17560115000000.000	17560115	000000.00	52.1	5.2	III	0.00	0.00	fake event
Duren (D), Hoofdschok	D	17560218074500.000	17560218	080000.00	50.76	6.311	VIII	5.70	n	Meidow (1995), AHEAD
Aix-la-chapelle	D	17600120221500.000	17600120	221500.00	50.74	6.42	VII	5.20	n	AHEAD
Harderwijk	NL	17810923000000.000	17810923	000000.00	52.3	5.6	II	0.00	0.00	acoustic?
Aken (D)	D	17950308035700.000	17950308	035700.00	50.8	6.1		0.00	0.00	?
Brussel (B)	B	18001109000000.000	18001109	000000.00				0.00	0.00	fake event, severe storm instead
Nederland (West-)	B	18021218000000.000	18021218	000000.00				0.00	0.00	fake event, maybe reference to 1803? No contemp. Messages
Rotterdam	NL	18031213000000.000	18031213	000000.00				0.00	0.00	fake event, same as 18040113, watermovements detected -large event?
Nederland (West-)	NL	18040113000000.000	18040113	000000.00				0.00	0.00	fake event, watermovement due to M6.7 event in Spain (Alboran sea)
Schiedam	NL	18040825100000.000	18040825	100000.00				0.00	0.00	fake event, watermovement due to M6.4 Spain (Almeria)
Aken (D)	D	18181104000000.000	18181104	000000.00	50.8	6.1	VI	4.50		AHEAD
Harderwijk	NL	18240818000000.000	18240818	000000.00			II	0.00	0.00	possibly acoustic
Maastricht	NL	18270223000000.000	18270223	000000.00			II	0.00	0.00	probably 1828-02-23; felt in Maastricht, more often errors in manuscripts
Hannut (B)	B	18280223083000.000	18280223	083000.00	50.7	5.12	VII	5.10	10.00	Camelbeek et al. (2021); location uncertainty: 10 km
Hautes-Fagnes (B)	D	18281203183000.000	18281203	183000.00	50.38	6.19	VI-VII	4.20	0.00	Knuts et al (2016), location uncertainty 30 km
Zwolle	NL	18290704010000.000	18290704	010000.00			II	0.00	0.00	tremors coinciding with strong winds?
Utrecht	NL	18320823120000.000	18320823	120000.00	52.1	5.1	II	0.00	0.00	fake? , Kunst en Letterbode 1832
Haarlem	NL	18331202020000.000	18331202	020000.00	52.4	4.6	II	0.00	0.00	zie Lorie; acoustic?
Veghel/Uden	NL	18430406053000.000	18430406	053000.00	51.6	5.6	V-VI	4.50	10.00	further investigation required (27 felt reports)
Nijmegen	NL	18460131020000.000	18460131	020000.00	51.8	5.9	II	0.00	0.00	storm?
Heeswijk Dinther	NL	18481218143000.000	18481218	143000.00	51.6	5.5	III	0.00	0.00	further investigation required, small event
Haarlem	NL	18500909074000.000	18500909	074000.00	52.4	4.6	III	0.00	0.00	acoustic? Many locations report even damage, neighbouring locations not
Haarlem	NL	18501219000000.000	18501219	000000.00	52.4	4.6		0.00	0.00	acoustic? Many locations report even damage, neighbouring locations not

LOCATION	Land	ID	YYMMDD	Time	Lat (N)	Lon (E)	Intensity	Magnitude	Depth (km)	Comments
Roermond	NL	18510121042000.000	18510121	042000.00	51.2	6	II	0.00	0.00	further investigation required
Haarlem	NL	18520524000000.000	18520524	000000.00	52.4	4.6	II	0.00	0.00	acoustic?
Harderwijk	NL	18590821000000.000	18590821	000000.00	52.3	5.5	III	0.00	0.00	acoustic?
Herzogenrath (D)	D	18731022094500.000	18731022	094500.00	50.88	6.158	VII	5.10	4.00	Leydecker 2011) solution, AHEAD
Herzogenrath (D)	D	18740828154500.000	18740828	154500.00	50.9	6.1	II	0.00	0.00	?
Brabant	NL	18760124193000.000	18760124	193000.00			II-III			to be investigated, newspaper reports
Herzogenrath (D)	D	18770624085300.000	18770624	085300.00	50.88	6.083	VIII	4.70	2.00	Leydecker (2011) solution; AHEAD
Tollhausen (D)	D	18780826090000.000	18780826	090000.00	50.93	6.548	VIII	5.50	n	Meidow(1995), AHEAD
Heerlen	D	18791100000000.000	18791100	000000.00	0	0		0.00	0.00	jongeneel, often wrong date
Aken (D)	D	18811118231400.000	18811118	231400.00	50.8	6.1	VI	4.90	13.00	Leydecker solution
Boxmeer	NL	18820811210000.000	18820811	210000.00	51.6	5.9	II	0.00	0.00	van Beurden, often incorrect information - needs extra check
Haarlem	NL	18830317051500.000	18830317	051500.00	52.4	4.6	IV	3.50	0.00	acoustic?
Herzogenrath (D)	D	18920624020000.000	18920624	020000.00	50.9	6.1	II	0.00	0.00	?
Den Haag	NL	19050429061500.000	19050429	061500.00	52.1	4.3	II	2.10	0.00	fake, acoustic??
Harderwijk	NL	19060108203000.000	19060108	203000.00	52.3	5.6	IV	3.50	0.00	acoustic?
Grathem	NL	19060831000000.000	19060831	000000.00	51.2	5.8	V	??	0.00	real event? Check reports. Felt in Grathem
Pouleur (B)	B	19081112091400.000	19081112	091400.00	50.46	5.64	VI	3.7	0.00	ORB solution, not recorded on JEN, HAM, DBN
Eifel (D)	D	19110530194340.000	19110530	194329.71	50.65	6.23		4.20	10.00	recorded on stations UCC,GTT,DBN,HAM,STR,JEN
Eifel (D)	D	19110531020820.000	19110531	020800.24	50.65	6.23		4.00	15.00	recorded on stations DBN, GTT, JEN, STR (HAM X)
Gosselies (B)	B	19110601225200.000	19110601	225248.22	50.45	4.5		4.20	10.00	recorded on stations UCC, DBN, STR, JEN (HAM X)
Gosselies (B)	B	19110603143500.000	19110603	143517.72	50.45	4.5		4.20	15.00	recorded on stations UCC, AAC, STR (HAM X)
Eifel (D)	D	19110906135447.000	19110906	135434.73	50.7	6.32	VI	4.10	15.00	recorded on stations GTT, DBN, HOH, POT, JEN, STR, HAM

Bijlage 3 – Toelichting SSHAC proces

This appendix is in English. It contains a description of the SSHAC levels and useful figures from chapter 3 of USNRC (2018).

SSHAC Level 1:

- Evaluation and Integration are undertaken by a Technical Integration Team (TI) rather than by an individual.
- More than one Technical Interrogator.
- Participatory Peer Review Panel (PPRP) consists of more than one person and reviews during the entire process, not only at the end.

SSHAC Level 2:

- Additional steps relative to SSHAC Level 1:
 - Outreach to external experts.
 - Preliminary hazard model is developed and calculated in order to assess which elements of the total uncertainty are exerting the greatest influence on the hazard results.
 - Cycle of review and feedback regarding the preliminary seismic source characterization (SSC) and ground motion characterization (GMC) models.
- TI team is required to document discussion and obtain written concurrence from the experts.

SSHAC Level 3:

- Larger group of key participants with more roles.
- Process is built around three major workshops: two in the Evaluation phase and one in the Integration phase.
- Including formal working meetings
- Technical experts produce a single logic tree that captures the overall distribution agreed by the evaluators through the process of technical challenge and defence.

SSHAC Level 4:

- Almost the same as SSHAC Level 3, apart from how the logic tree is built:
 - Each expert or expert team is charged with producing a logic-tree reflecting their view of the distribution that captures the center, body, and range of technically defensible interpretations. The Technical Facilitator Integrator is then charged with aggregating these individual logic trees into the final integrated distribution.

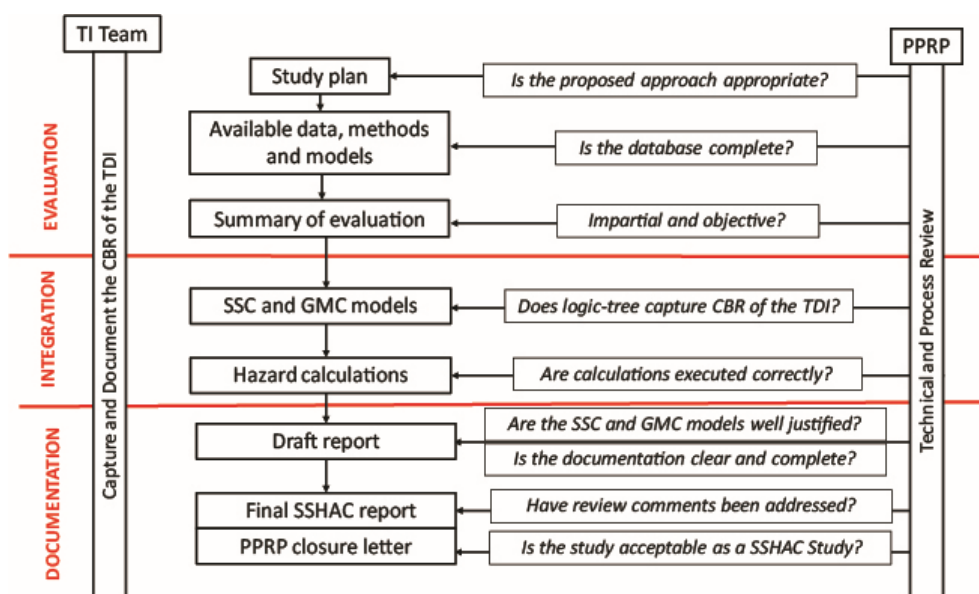
The level of effort increases from Level 1 to Level 2 to Level 3/4. The effort level for Level 3 and 4 is similar. The largest increase in effort is between Level 2 to Level 3/4.

An important consideration in the selection process is whether or not there is an existing PSHA. If so, that study might be subject to revision, refinement, or replacement. This depends on whether the existing PSHA

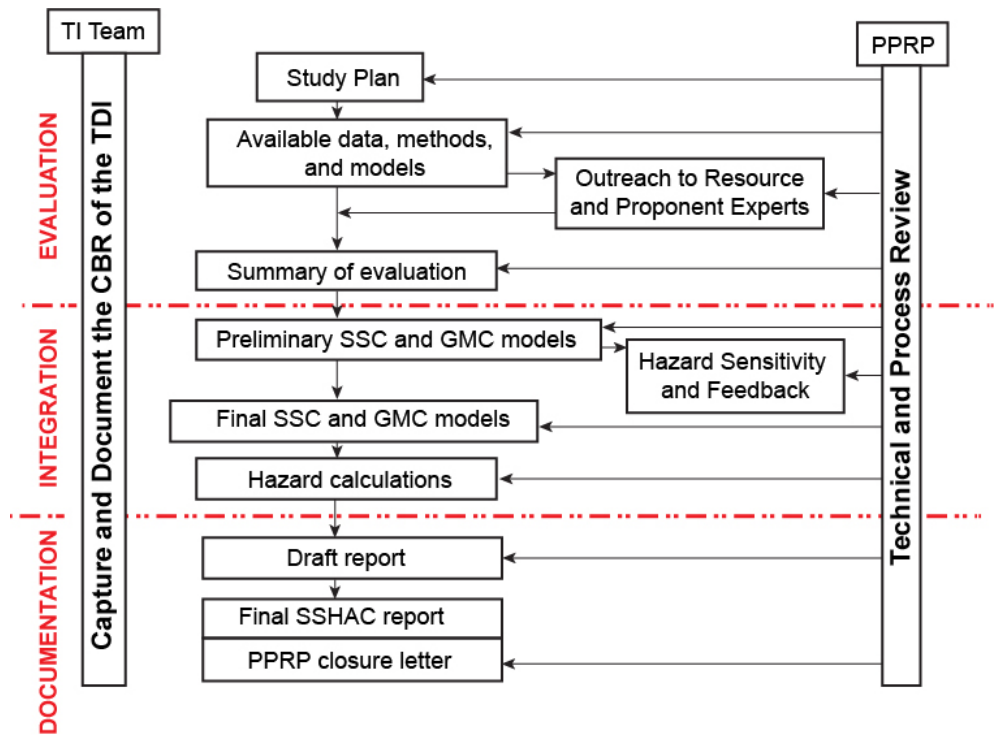
is a regional or site-specific study and the availability of new data, models, and methods.

The decision factors regarding the choice of SSHAC level include the scope and the need for the hazard study and the risk profile of the facilities. Factors to consider are:

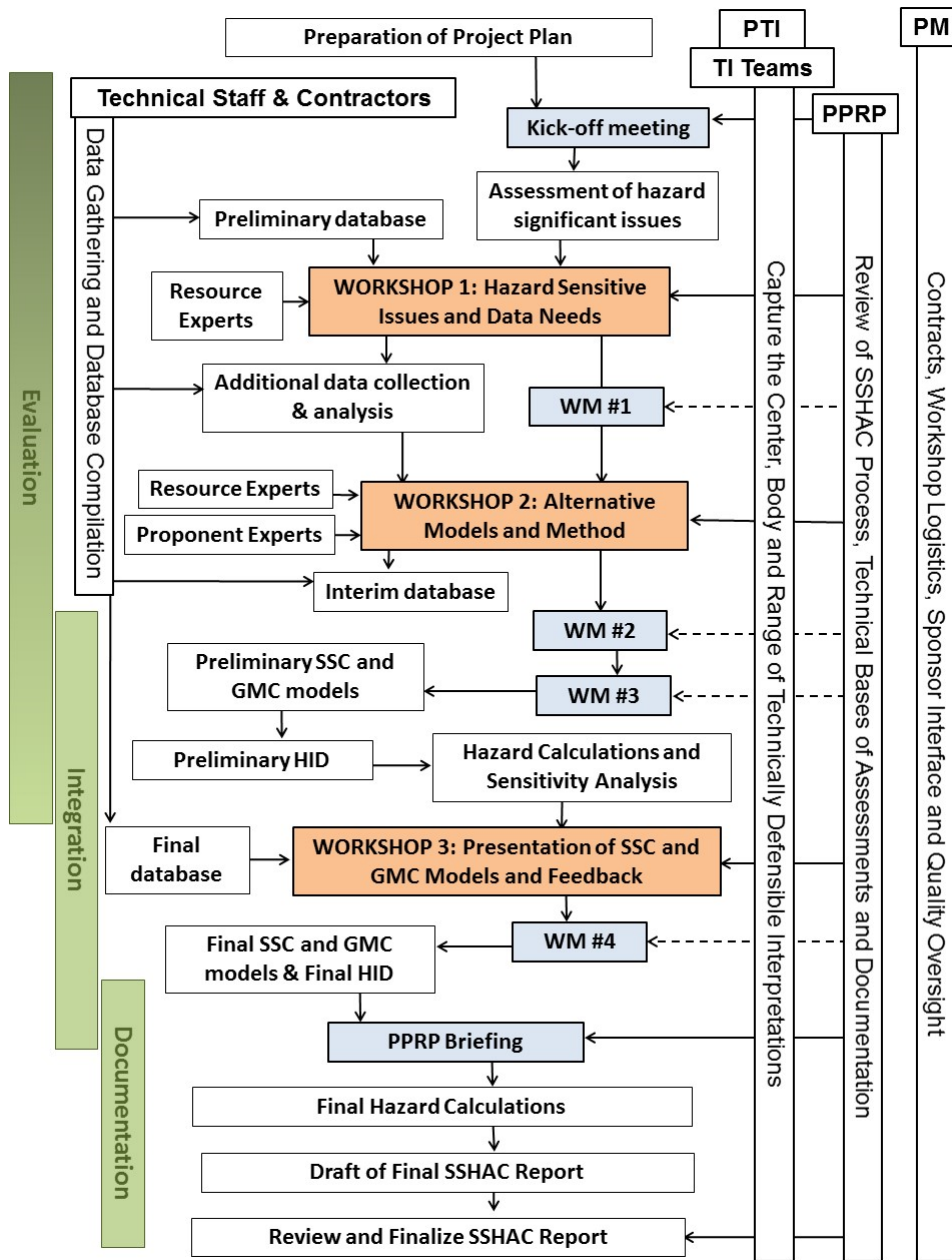
- the significance of the issue to the final results of the PSHA
- the issue’s technical complexity and level of uncertainty
- the degree of technical contention about the issue in the technical community
- the degree to which regulatory assurance is required
- available resources
- public perception



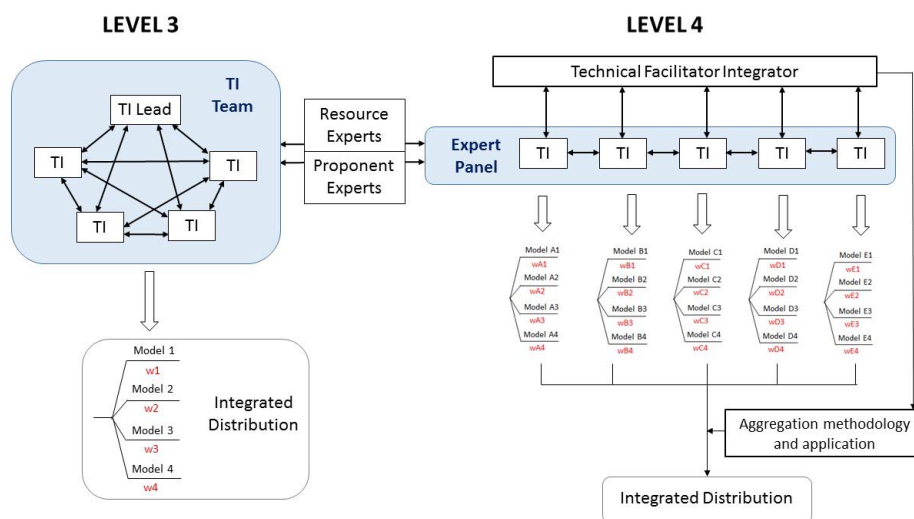
Figuur 10. Flowchart for a SSHAC Level 1 Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) study, with order of events running from top to bottom. Also indicating the review criteria and potential questions at each point of engagement by the PPRP (Figure 3-2, USNRC, 2018).



Figuur 11. Flowchart for a SSHAC Level 2 PSHA study, with time running from top to bottom. Showing the two additional steps relative to SSHAC Level 1 (Outreach to resource and proponent experts & hazard sensitivity and feedback). (Figure 3-3, USNRC, 2018).



Figur 12. Flowchart illustrating the key features in a SSHAC Level 3 process. The order of activities runs from top to bottom of the diagram. The timing of the working meetings reflects one suggested arrangement and alternative schemes may be used, although one meeting after Workshop #3 is essential. Dashed arrows indicate activities where one (or more) PPRP member(s) is selected to observe and represent the larger panel. (Figure 3-4, USNRC, 2018).



Figuur 13. Organizational and structural differences between Level 3 and Level 4 studies. The role of the PPRP is identical in both cases and the same sequence of at least three formal workshops is also followed in both cases. (Figure 3-5, USNRC, 2018).

Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut

Postbus 201 | 3730 AE De Bilt
T 030 220 69 11 | www.knmi.nl