

Duurzaam Herstel en Versterking van Woningen in Groningen

Hoofdstuk 1 Begrippenlijst en Afkortingen van AARDBEVING tot ZOUTLAAG



Abstract:

Verklarende begrippen, in alfabetische volgorde. Terminologie die gebruikt worden met betrekking tot geïnduceerde aardbevingen in de provincie Groningen. Vereenvoudigde uitleg met schetsen.

Kernwoorden o.a.:

Aardbeving, aardgas, *Base-isolation*, belangrijkheidsfactor, biogas, bodemdaling, bouwbesluit, breukvlak, compactie, COP, *damage state*, decibel, diafragma, dilatatie, ductiel, duurzaam, eigen gebrek, epicentrum, flexibiliteit, gebouwtipe, gedragsfactor, geïnduceerd, grondwater, HAS, hoofdstructuur, hoog risico, hypocentrum, KNMI, komvorming, kwetsbaarheid, Ladder van Lansink, *lateral force*, magnitude, maximum aardbeving, meetnetwerk, momentsterk, NAM, niet-constructief, NPR, NLTHA, onveilig, op staal, permeabiliteit, PGA, platform fundering, porositeit, reservoir, Richter, risico, *response spectrum*, RVS, seismisch, seismogram, sterk constructief glaspaneel, stutten, TCCB, terugkeertijd, testwoning, tilt meter, trilling meter, UVS, veen, veiliger maken, verbouwen, verduurzamen, versnellingsmeter, verweking, waarde-regeling, zetting, zoutlaag (Zechstein).



Door: Sjoerd Nienhuys
Bouwkundig, seismisch ingenieur
Juli 2023

Inleiding

Dit hoofdstuk 1 BEGRIPPEN en AFKORTINGEN van het boek 'Duurzaam Herstel en Versterking van Woningen in Groningen' geeft uitleg van begrippen die gerelateerd zijn aan de geïnduceerde aardbevingen in de provincie Groningen. Het geeft een algemeen inzicht in wat er speelt. Het begon allemaal honderden miljoenen jaren geleden met de **Zoutlaag**, uiteindelijk waren er de **Aardbevingen**.

Wie bekend is met de meeste begrippen, kan dit hoofdstuk overslaan.

Ten gevolge van de verkeerde aanname van de M_{max} , ontstond er in 2015 een groot verschil tussen concept 'veiligheid' van NPR9998-norm (Eurocode 8 = 'net niet instorten') en de wensen van de bevolking aan de andere kant ('veilig en scheurvrij wonen'). Terwijl de consultantbedrijven zich focuste op het versterken van gebouwen zodat ze 'net niet zouden instorten' waren lokale bouwbedrijven bezig met het cosmetisch herstel van scheuren, waarvan er vele bij de volgende aardbeving weer openstonden.

Problemen kunnen op verschillende manieren worden voorkomen, verwijderd of opgelost. Economische, politieke, emotionele, financiële en persoonlijke redenen speelden een rol in de besluitvorming over welke methoden, waar en wanneer zouden worden toegepast¹.

De meeste verklaringen zijn overgenomen van andere bronnen inclusief enkele tekeningen of foto's. De lezer hoeft dan niet apart te zoeken in die vele andere (Engelstalige) bronnen. Sommige termen zijn voor de duidelijkheid uitgebreid of vereenvoudigd. Bij een aantal woorden wordt een stukje achtergrondinformatie gegeven die in andere bronnen ook gevonden kunnen worden, maar dat is een zoektocht, terwijl de context met de Groningse geïnduceerde aardbevingen meestal niet wordt gegeven. In Wikipedia, Google, etc., worden hoofdzakelijk de woorden in een tektonische context uitgelegd; er zijn echter aanzienlijke verschillen met de geïnduceerde aardbevingen.

Sommige definities zijn sinds 2013 overgenomen van www.Namplatform.nl of www.Wikipedia.nl dat weer andere bronnen citeert en eventueel toegelicht. Voor bouwkundige termen zoals penanten, raveling, wolfskap, gebint, makelaar, enz. kan www.joostdevree.nl geraadpleegd worden.

Een aantal specifieke definities {met nummercode} zijn overgenomen uit de Nationale Praktijk Richtlijn², NPR9998:2015, waarvan er in 2015 de eerste officiële 'witte' uitkwam met **PGAg 0,36**. Een nieuwe, aanvullende en uitgebreider NPR9998:2017 had **PGAg 0,19**. In de latere versie NPR9998:2018 werd het **PGAg 0,13**, terwijl in 2020 er een aparte KNMI-Home Webtool³ was met de meer actuele PGA-waarden per exacte locatie, inclusief de invloed van de bovenste 30 m grondlagen, met maximale **PGAg van 0,11** en herhalingstijd van 475 jaar. De frequente wijzigingen hebben tot veel onbegrip bij de bevolking geleid.

Bij een aantal van de woorden is de *Engelse term in cursief* toegevoegd. Deze worden door de technici veel gebruikt omdat het Nederlandse alternatief geen bekend begrip is. Een voorbeeld hiervan is het woord *shear* dat wordt vertaald door 'schuif of afschuiven' die veelvuldig worden gebruikt in de aardbevingstechniek, zoals *shear force* (schuifkracht), *shear stress* (schuifspanning), *shear wall* (muur die berekend is op schuifkrachten). Een ander voorbeeld is het woord *Base-isolation*.

Voor een duurzaam herstel of versterking is een goed begrip van de bestaande situatie essentieel.

¹ Vanuit het epicentrum zou de versterkingsaanpak gefaseerd worden uitgevoerd; eerst openbare gebouwen.

² Laatste versie gratis te downloaden via: <https://www.nen.nl/npr-9998-2020-nl-278147>

³ KNMI-website met steeds geactualiseerde grondwaarden: <https://seismischekrachten.nen.nl/map.php>

Inhoudsopgave

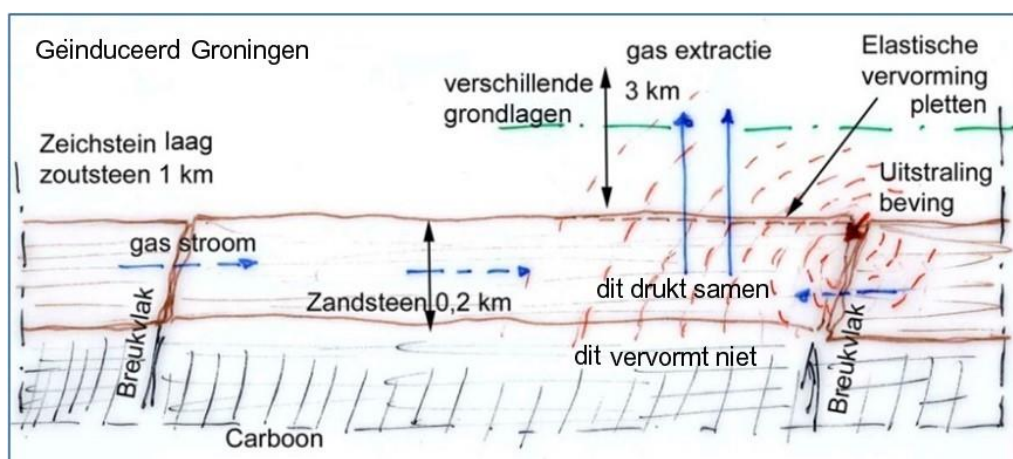
Aardbevingen	5
Aardbevingen in Nederland	6
Aardbevingsbestendig	8
Aardbevingsbestendig Bouwen – Nieuwbouw	10
Aardbevingsbestendig - Verbouwen	11
Aardbevingsbestendig versterken	14
Aardgas of methaan	15
Accelerometer	16
Base-isolation (<i>Base-isolation</i>)	17
Belangrijkeheidsfactor	19
BENG. Bijna Energie Neutrale gebouwen	20
Biogas, methaangas	21
Bodemdaling (Komvorming)	21
Bodemdaling commissie	22
Boorgatseismometer	22
Bouwbesluit	23
Bouwkundig versterken	23
BoWoTo. Bouw en Woning Toezicht	24
Breuk(vlak)	24
Capaciteitsmethode voor ontwerp	25
Circulair bouwen	26
Compactie	26
COP Coëfficiënt van Performance	27
Cultureel erfgoed (heritage)	28
CVW, Centrum Veilig Wonen	28
Damage State (schade niveau)	29
Decibel, geluid	31
Diafragma (<i>Diaphragm</i>)	32
Dilatatie van gebouw	33
Directe bezetting of gebruik	33
Duur van een aardbeving	34
Ductiel / Taai	36
Duurzaam Bouwen (Circulair Bouwen)	37
Dynamisch onafhankelijke eenheid	38
Eigen Gebrek	39
Elasticiteit (of veerkracht)	42
Epicentrum	42
EVS (<i>Extended Visual Screening</i>)	43
Flexibiliteit voor gebouwen	44
Frequentie schokken en sterkte	44
Gebouwtipe (<i>building typology</i>)	45
Gedragsfactor (<i>Behaviour factor</i>)	49
Geïnduceerde aardbeving	50
Grondwater	53
HAS, Helical Application System	54
Hoofdconstructie	55
Hoog-Risico Elementen	55
Hoog-Risico Gebouwen	55
Hypocentrum	56
Instituut Mijnbouw Schade, IMG	57
Inklinking57	
Komvorming	57

Koudebrug (verkeerd, maar ingeburgerd taalgebruik)	58
KNMI, Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut.....	58
Kwetsbaarheidsdiagram	59
Ladder van Lansink	60
Lateral Force Resisting System (statische weerstand berekening)	61
Magnitude of Intensiteit	61
Maximum aardbeving, Mmax	63
Meetnetwerk.....	64
Momentsterke structuur.....	64
Nationale Coördinator Groningen (NCG).....	64
Niet-constructief gebouw onderdeel	65
NLTHA. Non-Linear Time-History Analysis	65
Noodmaatregelen	67
Nederlandse Praktijk Richtlijn, NPR9998	67
Onveilige situatie.....	68
Op staal (gebouwd of gefundeerd)	69
Permeabiliteit.....	69
Piek grondversnelling, PGA	70
Platform fundering, Plaatfundering	70
Primaire seismische gebouw onderdelen	71
Ratio (<i>aspect ratio</i>).....	71
Reservoir, reservoirgesteente	72
Reservoirdruk	72
Richter, schaal van.....	73
Respons spectrum	73
Risico overlijden	74
Schade en scheuren	75
Schaliegas	76
Scheurvorming	77
Secundaire seismische gebouw onderdelen	77
Seismiciteit	78
Seismische golven	78
Seismograaf of seismometer.....	79
Seismogram	79
Sterk Constructief Glaspaneel	80
Stutten en steigers	81
Terugkeertijd (herhalingsstijd).....	82
Testen in Italië.....	82
Testwoningen	83
Tilt-meter.....	85
Triggerwerking.....	85
Trilling-meter, seismometer.....	85
Trilling frequentie	87
Uitputting gasveld	88
Veengronden.....	89
Veiliger maken.....	90
Verduurzamen.....	91
Verweking.....	92
Zandsteen.....	92
Zetting van grond	93
Zoutlaag (<i>Zechstein</i>)	93

Aardbevingen

Aardbevingen zijn grondtrillingen die ontstaan door plotseling verschuivende of plotseling vervormende gesteentemassa's in de diepe ondergrond. De plotselinge schokbewegingen treden op langs breuklijnen in de tientallen kilometers diepliggende aardkorst waar continentale aardkorsten tegen elkaar aan drukken en verschuiven (dit zijn de tektonische bevingen). Breuklijnen komen ook voor in de 3 km diepliggende aardgas-houdende zandsteenlaag onder de provincie Groningen en de Noordzee. Wanneer er drukverschillen in die zandsteenlaag ontstaan doordat aan één kant van de breuklijn snel en veel aardgas wordt onttrokken en in een andere zone niet, ontstaat eerst een elastische samendrukking in de zandsteenlaag. Wanneer deze elastische vervorming de druksterkte in die zone overstijgt, verpulvert de structuur van het zandsteen met een schok die het omliggende gesteentes doet vibreren⁴. Aan het aardoppervlak voelt men die beving en hoort men vaak een knal. Omdat het aardgas in de provincie Groningen door mensen wordt onttrokken, hebben deze bevingen geen natuurlijke oorzaak en worden geïnduceerde aardbevingen genoemd.

*Figuur 1-1.
Geïnduceerde
aardbeving
heeft geen
opdrukken van
het
onderliggende
Carboon.*



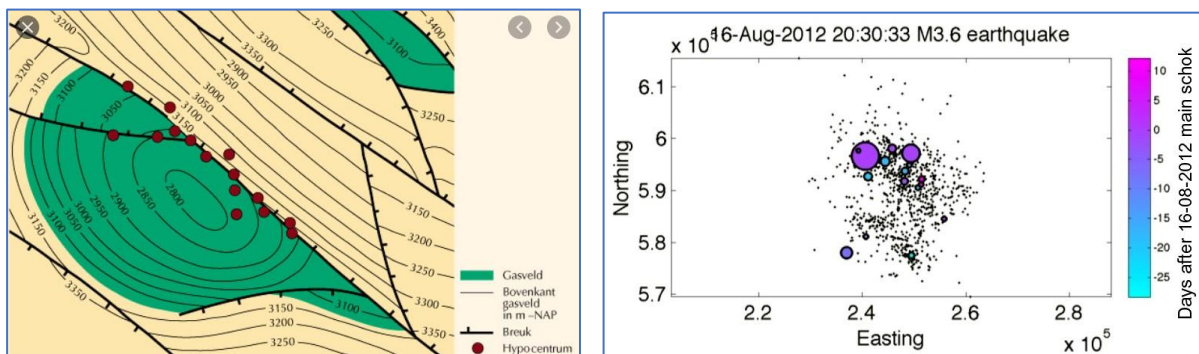
Door snelle onttrekking van aardgas uit het poreuze zandsteen ontstaat er een plaatselijke drukverlaging van dat gas in die zandsteenlaag, meestal aan één kant van een breukvlak. Hierdoor wordt de draagkracht van het zandsteen minder (gasdruk plus zandsteensterkte). Door de druk van de 3 km grondlagen, wordt bij overstijgen van de draagkracht het zandsteen plotseling geplet (compactie). Later zal dit ook leiden tot kleine zettingen boven in de taaie zoutsteenlaag en compactie naast het eerste compactie-gebied.

Alle gesteentes zijn enigszins elastisch. Bijvoorbeeld, een lang en dun stuk marmer of graniet kan je iets buigen. Wanneer de vervorming door druk of verbuiging de elastische grens van het materiaal heeft bereikt, zal het breken. Dit veroorzaakt een plotselinge spanningsverandering. De trillingen die bij een breuk vrijkomen, planten zich als schokgolven in de ondergrond in alle richtingen voort. De ene schok veroorzaakt vaak meteen andere schokken. In dat geval duurt de aardbeving voor het gevoel langer. Omdat de schok het gebouw laat trillen, zullen de meeste constructies nog even natrillen waardoor het voor de mensen in het gebouw lijkt of de aardbeving langer aanhoudt.

Seismometers kunnen deze trillingen of aardbevingen aan het aardoppervlak registreren. Verspreid over het land heeft het KNMI veel meetstations ingericht⁵. Het digitaal opgeslagen trilling-signaal kan als seismogram grafisch worden weergegeven. Omdat sommige, lichtere aardbevingen het gevolg kunnen zijn van gaswinning uit deze zandsteenlaag, zijn ook seismometers in boorgaten diep onder het aardoppervlak in Noord-Nederland geplaatst.

⁴ Zie ook: https://en.wikipedia.org/wiki/Elastic-rebound_theory en <https://www.youtube.com/watch?v=HQFTDAzhbZM> en <https://www.youtube.com/watch?v=HPRLrk7UFbQ&list=RDCMUCo7diqNFmYbm8nrVUEPtTsQ&index=>

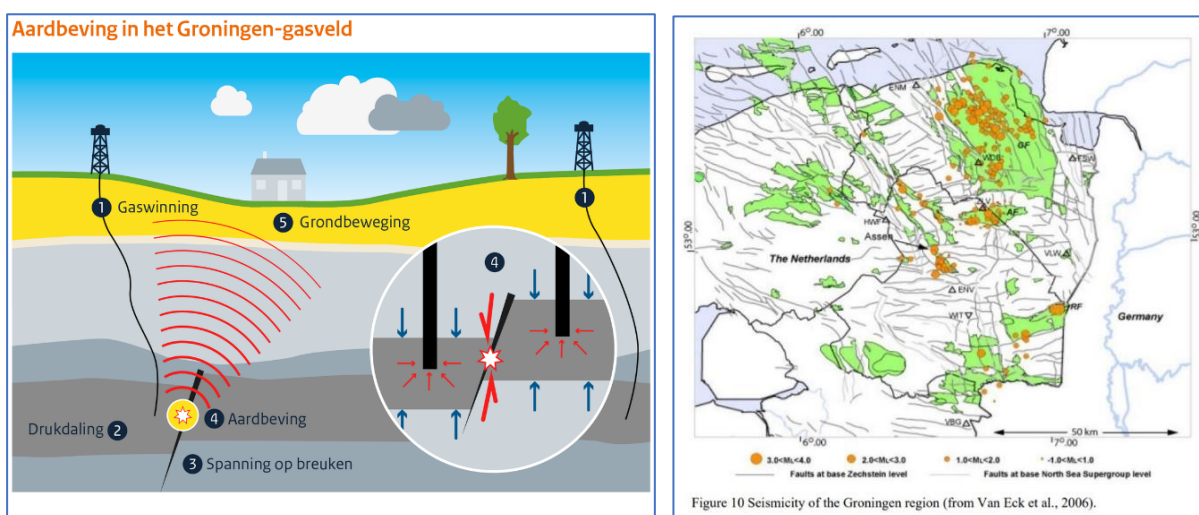
⁵ Om de effecten en karakteristieken van de aardbevingen in Groningen beter te meten werden er sinds februari 2014 nog tientallen nieuwe meetpunten door NAM, KNMI en TNO ingericht.



Figuren 1-2. Links: dieptelijnen en gemeten locaties van de schokken langs de breuklijnen⁶.

Rechts de hoofd- en naschokken van de Huizinge 18-06-2012 aardbeving. Deze laten zien dat rondom de grotere bevingen veel kleine extra bevingen/zettingen voorkomen. Op de duur kunnen ook kleine zettingen (schokken) boven de taaie zoutsteenlaag voorkomen op een diepte van tussen de 1 en 2 km onder het maaiveld.

De diepe plaatsing van seismometers voorkomt storing door trillingen aan het aardoppervlak (heien, verkeer). Sinds 2014 zijn er in de funderingen van een paar honderd woningen in de provincie Groningen eveneens trilling-meters geplaatst⁷ Er zijn ook een aantal 3 km diepe trilling-meters geplaatst. Het KNMI-netwerk bestaat uit *geophones* in de boorgaten (tot 300 m diepte), versnellingsmeters en "broadband" seismometers.



Figuren 1-3. Links: In verschillende publicaties worden **verkeerde** voorstellingen gemaakt over het ontstaan van de bevingen. Op deze afbeelding wordt gesuggereerd dat de onderliggende Carboon-laag omhoog drukt langs de breuklijnen. Die breuklijnen in het Carboon lopen veelal door in de zandsteenlaag, maar het Carboon wordt niet naar beneden gedrukt, alleen de zandsteenlaag wordt geplet.

Rechts: Reeds in 2006 werd er een gedetailleerde kaart gemaakt van de toen bekende breuklijnen in de zandsteenlaag. Deze breuken lopen door tot onder de Noordzee.

Aardbevingen in Nederland

Slappe veenbodems en elastische klei reageren heel anders op aardbevingen dan rotsbodems. In elastische of slappe grond zoals veen kunnen langdurige aardbevingen een zogenaamd opslinger-effect hebben⁸ of bij drijfzand zettingsvloeiingen veroorzaken.

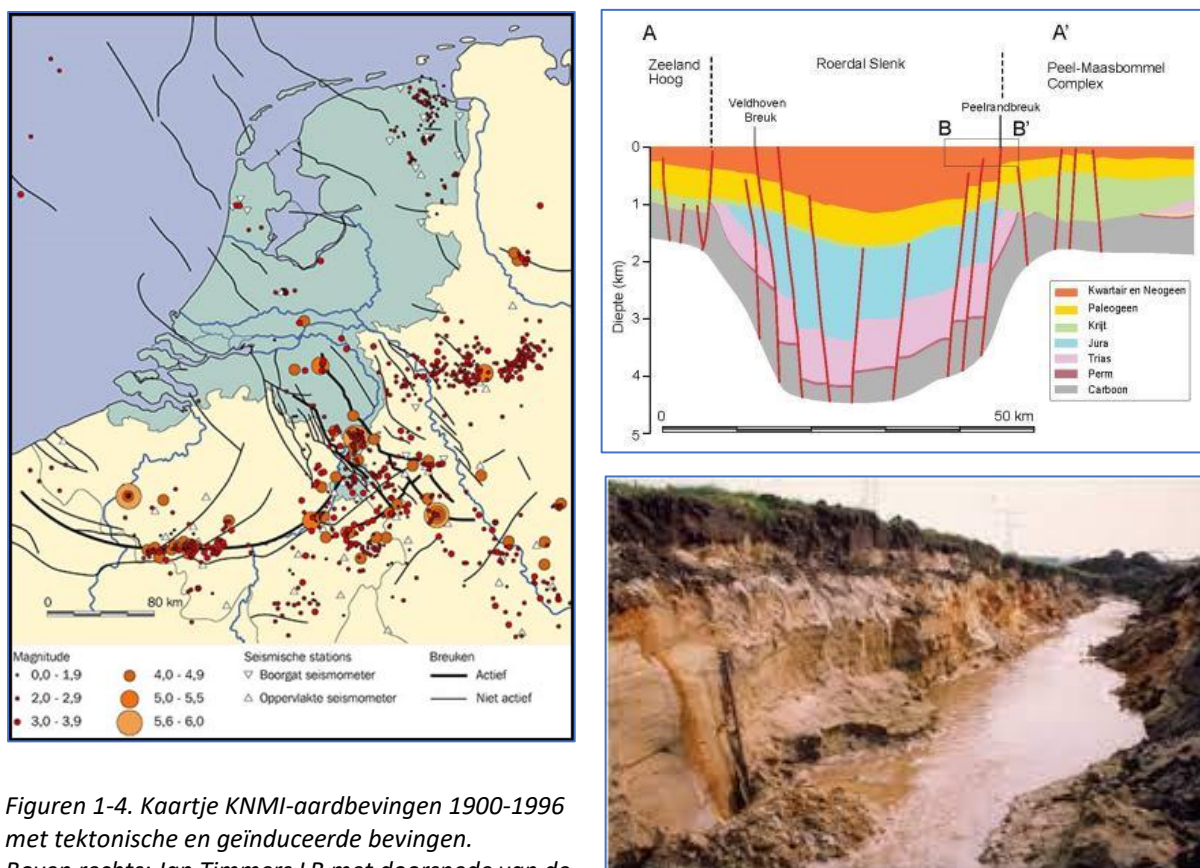
⁶ Bron: De Groene Rekenkamer. Detail weergave van registraties over het hele gasveld.

⁷ Er zijn later ook een aantal tilt-meters geplaatst op gebouwen geplaatst, maar die hebben een andere functie.

⁸ Pas in 2022 is er een rapport door de KNMI opgesteld over het mogelijke opslinger-effect bij grote aardbevingen. Echter, met de zeer korte duur van de geïnduceerde aardbevingen (enkele seconde) is dit praktisch nihil.

<https://www.knmi.nl/over-het-knmi/nieuws/opslingerkaart-voor-aardbevingen-in-nederland>

Zettingsvloeiingen komen vanwege de korte duur van de geïnduceerde schokken in Nederland niet voor⁹. Slappe gronden vertragen en absorberen een beetje de korte felle Groningse schokken; de nieuwste PGAg-kaart houdt daar rekening mee¹⁰.



Figuren 1-4. Kaartje KNMI-aardbevingen 1900-1996 met tektonische en geïnduceerde bevingen.

Boven rechts: Jan Timmers LR met doorsnede van de Peelrandbreuk <https://www.deurnewiki.nl/wiki/index.php?title=Peelrandbreuk>

Foto van na de aardbeving 13-04-1992 te Roermond waar in één keer de grond plaatselijk wegzakte met 60 cm.

Ondanks hun relatief lage magnitude¹¹ van de Huizinge 2012 beving, op de schaal van Richter (3,6 met PGAg < 0,1), zijn de door gaswinning opgewekte aardbevingen sterk voelbaar. Dit komt door hun **ondiepe hypocentra** (3 km) waardoor ze hard op het epicentrum aankomen. Deze geïnduceerde aardschokken duren echter zelden langer dan een deel van een seconde, maar gebouwen aan het oppervlak trillen na door hun eigen elasticiteit. Bij breuken die hoofdzakelijk in de zandsteenlaag zitten, zoals in de provincie Groningen, zullen de zakkingsverschillen aan het aardoppervlak heel klein zijn¹². Dit komt onder andere omdat het boven het zandsteen liggende Zechsteen taai is en de directe vormverandering in het zandsteen slechts gedeeltelijk doorgeeft.

Er is geen duidelijke begrenzing van wat een aardbeving is en wat een trilling. Over het algemeen zou men kunnen zeggen dat trillingen niet direct door mensen worden gevoeld (Mw < 2,4 of PGAg < 0,04) en korter dan 1 seconde. Wanneer de schokken groter zijn, zullen de oppervlaktetrillingen en de gebouwresonantie langer duren en dan worden ze eerder door mensen gevoeld. Trillingen hebben echter wel effect op funderingen en kunnen beschadigingen/verzakkingen veroorzaken.

Tussen 2012 en 2017 werd funderingsschade nauwelijks erkend. Om duidelijkheid te brengen over het type trillingen wat gebouwschade kan veroorzaken, werd in 2017 een Trilling-richtlijn SBR-A2017

⁹ In de Nieuw-Zeeland beving 2010-2011 kwamen ze wel voor vanwege de lange duur van de bevingen. Meer informatie en video's op: <https://apps.canterburymaps.govt.nz/ChristchurchLiquefactionViewer/>

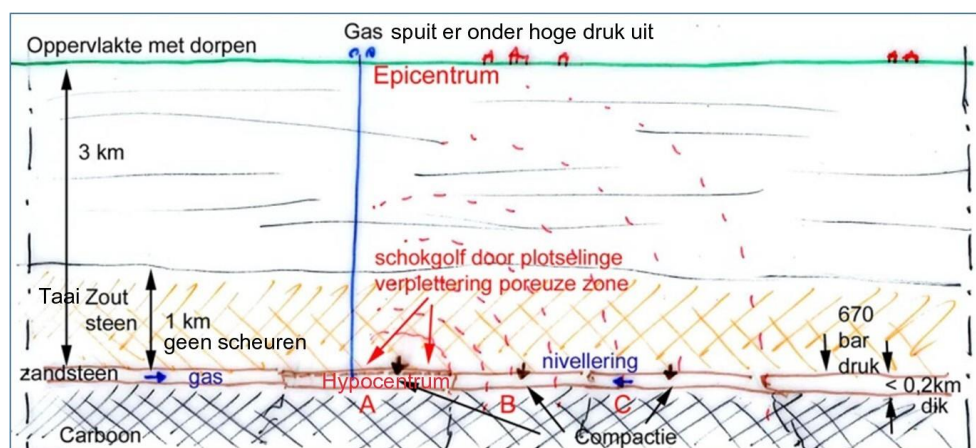
¹⁰ In de laatste Webtool kaart van de KNMI is het effect van de bovenste 30 grondlagen op de beweging van het maaiveld meegenomen. <https://seismischekrachten.nen.nl/> en <https://seismischekrachten.nen.nl/map.php>

¹¹ In vergelijking met tektonische aardbevingen. De massale bewegingen/verschuivingen van tektonische aardbevingen zijn vele malen groter dan de kleine compacties in het Groningse reservoirgesteente.

¹² De geschatte bodemzakkingen t.g.v. de gasonttrekking liggen op ongeveer 1 tot 1,5 cm per jaar. In het centrum een zakking van ongeveer 60 cm over een periode 50 jaar sinds het begin van de gaswinning in 1970.

opgesteld¹³. Deze Trilling-richtlijn stelt dat nieuwe gebouwen een bepaalde hoeveelheid trillingen moeten kunnen doorstaan zonder schade op te lopen. Veel oude gebouwen met zwakke funderingen kunnen dan toch wel bevingsschade oplopen.

De bodem bestaat uit verschillende aardlagen, zoals de gashoudende zandsteenlaag (≈200 m dik), daarop een afsluitende zout- of kleilaag (≈1000 m dik), en daarop 2 km andere grondlagen. Door winning van aardgas neemt de inwendige gasdruk plaatselijk in die zandsteenlaag af waardoor deze ingedrukt wordt; dit heet 'compactie'. Op termijn leidt dit tot bodemdaling aan het oppervlak. Deze vindt over de gehele provincie zeer geleidelijk plaats en is niet voelbaar is. De bodemdaling wordt jaarlijks precies gemeten met behulp van satellieten, omdat het wel grote invloed heeft op de grondwaterstand¹⁴. Deze bodemdaling heeft daardoor ook grote invloed op de waterhuishouding en het rioleringsysteem.



Figuur1-5. De schets is voor de zandsteenlaag in de juiste hoogte verhouding getekend.

Gebouwen die verder dan 3 km horizontaal van het epicentrum vandaan staan ondervinden meer een horizontale invloed van de schokken. Aan de bovenkant van de zoutsteen laag kunnen nog kleine (niet-voelbare) zettingen plaats vinden. Voor het hele gebied van de provincie zal over de jaren een zetting van ≈ 60 cm plaats vinden overeenkomend met de compactie in het zandsteen.

Aardbevingsbestendig

Earthquake resistant {Eurocode 1.4.2.22}

Gebouwen zijn volgens de Eurocode 8 aardbevingsbestendig als de kans dat er slachtoffers vallen door **gedeeltelijk of geheel bezwijken voldoende klein** is¹⁵. Dit betekent dus niet dat er geen schade zal optreden. Een gebouw dat ontworpen is om de theoretisch maximale aardbeving te doorstaan, zal bij deze theoretisch **maximale aardbeving NET NIET in elkaar storten**, indien het volgens de berekeningen is gebouwd of versterkt. Echter het gebouw zal zich dan in een 'bijna ingestort' situatie bevinden (*Near Collapse*). In een dergelijk geval zal het gebouw meestal niet economisch te herstellen zijn.

Het aangenomen risico bij deze *Near Collapse* situatie (voor tektonische aardbevingen) is 1:100.000 of 10^{-5} . Dit betekent dat op 100.000 gebouwen er toch nog één gebouw in mag storten met één dodelijke afloop en per jaar. Bij een aantal van > 200.000 woningen zou dat dan > 2 instortingen per jaar betekenen. Over een 10 jaar periode zijn dat dan 20 doden. Echter als er gemiddeld 4 personen in een gebouw verblijven, betekent dat 8 doden per jaar. De vraag is of je diezelfde (lage norm) ook mag toepassen voor geïnduceerde aardbevingen, omdat deze bewust worden veroorzaakt door een

¹³SBR Trillingsrichtlijn A Building 2017 <https://www.building.nl/uploads/fckconnector/bbb3c9ac-bf69-4a11-ad06-95a88aeca916/3016759984>

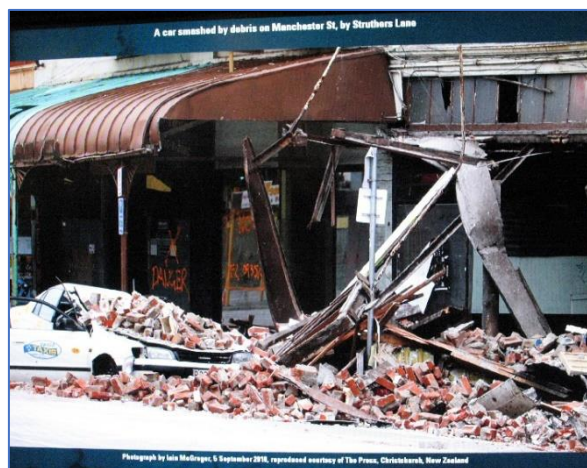
¹⁴ Zie ook het kaartje bij 'Zettingen' met bodemdaling ten gevolge van het inklinken van veenlagen.

¹⁵ Voor nieuwbouw onder de bouwverordeningen van 1992 en later is deze kans 1 op de 100.000 (of $1:10^5$)

bedrijf.¹⁶ Een 10X kleinere risiconorm van 10^{-6} , zoals van toepassing is op de Nederlandse zeevering, zou dan een stuk veiliger zijn.

Aardbevingsbestendig betekent dus NIET dat er bij de maximale beving GEEN schade zal zijn, in tegendeel, het betekent in de praktijk dat bij een M_{max} de gebouwen zo zwaar beschadigd zijn dat ze economisch niet te herstellen zijn. Bovendien zijn **vallende topgevels of schoorstenen uitgezonderd, want die kunnen** (volgens de tektonische seismische code) dan nog wel naar beneden vallen en en dodelijke slachtoffers maken.

Mensen die proberen in de tijd dat de aardbeving duurt uit hun woning rennen kunnen getroffen worden door vallend puin van gevels¹⁷. In Christchurch New Zealand veroorzaakten de op straat vallende topgevels de meeste dodelijke ongevallen tijdens de aardbeving (22 februari 2011).



Figuur 1-6. Aardbeving van 22 februari 2011 in Christchurch, New Zealand.

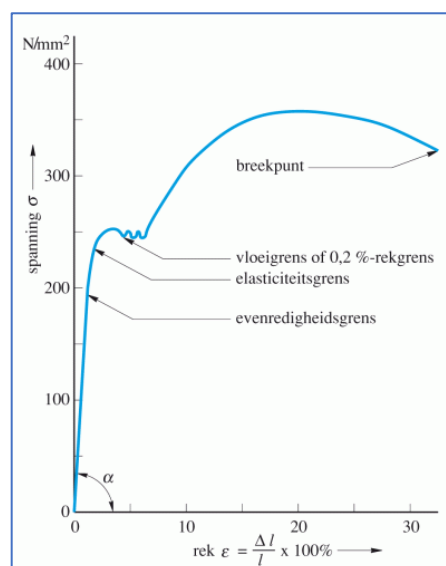
Hier vielen midden op de dag de topgevels van winkelpuien op straat waardoor tientallen mensen overleden. Uit het huis rennen gedurende een aardbeving is zelden een goed idee. Tijdens de erg korte geïnduceerde bevingen is er geen tijd om de woning te verlaten.

Een nieuwbouwwoning die volgens het 2012 Bouwbesluit is gebouwd kan 30% tot 50% hogere belastingen opvangen dan waarvoor deze is ontworpen. Dit komt omdat in de meeste bouwnormen voor materialen een veiligheidsmarge is ingebouwd. De materiaalnorm komt vaak overeen met de laagste waarde van een grote serie testen; niet het gemiddelde.

Figuur 1-7. Trekdigram van staal. Uit bouwkunde boek.

De rekennorm is de evenredigheidsgrens van het staal (waarbij de verlenging hetzelfde % heeft als de verhoging van de trekkracht) wordt gebruikt in de berekeningen, terwijl de elasticiteitsgrens tot 230 N/mm^2 loopt. Echter, na vervorming kan het staal nog een belasting opnemen tot ongeveer 350 N/mm^2 , bijna tweemaal de rekennorm. In mindere mate komt dit fenomeen ook bij andere bouwmaterialen voor.

Omdat het aardbevingsbestendig verbouwen een uitgebreide ingreep kan zijn, kan men besluiten om minimaal tot de sterkte van het Bouwbesluit 2012 te versterken of tot 50% van de NPR 9998:2020, welke de hoogste versterking oplevert. Dit is gebaseerd op het bovenstaande inzicht, dat de nieuwbouwnorm sterker is dan de netto sterktebehoefte.



Bij de berekening van gewapend betonconstructies zit er ook een extra veiligheidsmarge boven op de materiaalsterkte. Metalen constructie onderdelen en de wapening in gewapend beton zijn ductiel (taai), waardoor ze na vervorming nog steeds hoge belastingen kunnen opnemen.

¹⁶ Vanuit het Nederlandse privaatrecht is het niet toegestaan om bij de uitvoering van werkzaamheden (bijvoorbeeld gaswinning) schade toe te brengen aan de eigendommen van anderen.

¹⁷ Bij een beving van < 3 secondes is dit onmogelijk. Eerst moet je realiseren dat er een beving is; dat duurt al een seconde. Het beste is om onder een sterke tafel te duiken zoals voor scholen wordt onderwezen.

Om tot een besluit te komen om gebouwen slechts tot 50% van de aardbeving belastingnorm te versterken, is het wel noodzakelijk dat de netto materiaalsterkte in het gebouw bekend is en er een goede analyse van de bestaande constructie wordt gemaakt. Dit laatste is moeilijk en kostbaar bij oude gebouwen¹⁸. Elke bouwperiode in Nederland heeft haar eigen bouwwijze of typologie; de naoorlogse woningbouw is hiermee verdeeld in blokken van ≈ 20 jaar.

Gedurende de jaren dat deze oudere woningen bewoond waren, werden er verbouwingen uitgevoerd en stukken aangebouwd volgens andere bouwnormen. Bij aanbouwen ontstaan stevast scheuren wanneer ze onderling niet goed gedilateerd zijn, terwijl open keukens de hele gebouwconstructie bij kunnen verzwakken tegen seismische belasting.

Door een paar gelijksoortige gebouwen (typologie) uit een bepaalde bouwperiode in detail te bestuderen, kan met redelijke zekerheid worden bepaald wat de gebouwsterkte is van al die gebouwen in die typologie categorie, en wat er aan een dergelijk gebouw verbeterd moet worden om het aardbevingsbestendig te maken of te versterken.

Op basis van dit begrip werden sinds 2018 van 60 woningtypologieën gedetailleerde berekeningen en versterkingsadviezen (VA's) gemaakt door TNO, volgens welke de beschadigde woningen hersteld zouden kunnen worden. Echter, de 2018 PGA-waarden waarop deze berekeningen waren gestoeld zijn nog steeds erg hoog, tenminste 3X zo hoog als de werkelijke waarde.¹⁹

Aardbevingsbestendig Bouwen – Nieuwbouw

Dit is het ontwerpen en bouwen van de hoofddraagconstructie en de rest van het gebouw volgens de bestaande aardbevingscode of richtlijnen. De Europese Eurocode 8 geeft deze aan. Deze werd in 2013-2014 naar het Nederlands vertaald in de NPR 9998:2015. Echter, de aardbevingszonerings van die NPR (zie kaartje PGAg = Piek Grondversnelling) was gebaseerd op de 2014 aannames over de theoretisch maximale aardbevingssterkte. Die aannames waren volstrekt verkeerd. Men moet niet kijken hoe zwaar je de aardbevingen kan maken, maar hoeveel bevingbelasting de woningbouw kan hebben. Met de aardbeving van Huizinge 2012 (PGAg 0,085) bleek het aardbevingen boven die waarde al niet wenselijk waren, tenzij men eerst alle 20.000 woningen in het epicentrumgebied zou versterken. Dat zou een operatie zijn van tenminste 5 jaar.

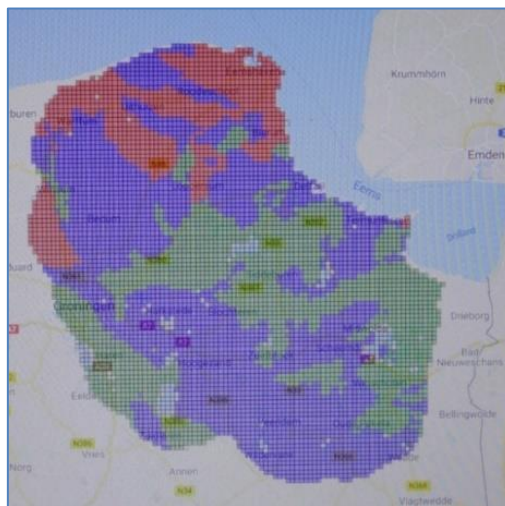
De sterktes van de schokken houden verband met de methode van gaswinning. Verandert de gaswinningsmethode verder, zoals deze in 2015 ten eerste al werd genivelleerd (gelijkmatige drukverdeling in het gasveld) en daarna meermaals werd verminderd (Wiebes 2018: "Kraan dicht in 2030 of eerder"), dan zullen de trillingen in sterkte, duur en frequentie afnemen. Wanneer gas uit het hele veld wordt onttrokken zal er over het hele veld compactie ontstaan, dus op verschillende locaties kunnen zich dan aardbevingen voordoen. Vanwege de verminderde gasproductie werd de NPR9998:2015 daarom verschillende malen aangepast²⁰.

¹⁸ Om dit bij benadering uit te rekenen met de Non-Linear-Time-History-Analysis (NLTHA) methode wordt een woning uitgebreid geanalyseerd en doorgerekend, wat 2-3 weken en meer dan euro 15.000 kan kosten (2015). Op die basis daarvan kan dan een versterkingsvoorstel gemaakt worden (nog eens euro 5.000). Bij een maximale beving PGA zal dan het gebouw alsnog zeer zwaar scheuren, maar 'net niet instorten'.

¹⁹ Aan de andere kant, wanneer je een gebouw 3X sterker maakt dan de werkelijke aardbeving die gaat optreden, wordt de kans op scheuren ook weer kleiner, hoewel dat met brosse baksteen maar betrekkelijk is.

²⁰ De laatste versie van de NPR is [NPR 9998:2018+C1:2020 \(nl\)](https://www.nen.nl/NEN-Shop/Norm/NPR-99982018C1:2020(nl)), welke gratis kan worden gedownload op <https://www.nen.nl/NEN-Shop/Norm/NPR-99982018C12020-nl.htm>

Figuur 1-8. Voorbeeld van Home Webtool NPR9998:2018.²¹ In plaats van periodieke wijzigingen is er sinds 2020 voor de bepaling van de PGA-krachten de Home Webtool NPR9998 van toepassing, die per plaats de te verwachten maximale PGA weergeeft met horizontale en verticale factoren voor 95, 475, 975 en 2475 jaar.



Voor een herhalingsijd van 95 jaar is op deze Webtool per mei 2020 de hoogste PGAg = 0,085 incl. grondfactor, en gelijk aan de zwaarste aardbeving op 16 augustus 2012 in Huizinge met Richter 3,6.

Sinds de sterke vermindering van de gasexploitatie zijn de hoogste aardbevingen \leq Richter 3,6 (PGAg van \leq 0,1).

In de buitengebieden kan de PGA < 0,05 zijn, waarbij er geen seismische berekening meer nodig is.

De NPR9998:2020, en de daaraan gekoppelde Ontwerprichtlijn voor Aardbevingsbestendig bouwen, zijn echter geen verplichte wetgeving²². Als men uit zou gaan van de beschikbare norm of wetgeving, dan moet de draagconstructie van het gebouw voldoen aan het geldende Bouwbesluit 2012 (met aanpassing juli 2013 voor stormwindbelasting). Dat is aanzienlijk minder veeleisend dan de NPR.

Het Bouwbesluit verwijst naar de Eurocode 8 voor aardbevingsbestendig bouwen, maar de Eurocode 8 verwijst ook naar de nationale bijlage. Deze nationale bijlage met het aardbeving zoneringskaartje is nu te vinden in de laatste NPR9998:2020

De eerste maximale beving werd in 2014 vastgesteld²³ op 5 X de 16-08-2012 Huizinge beving (PGAg 0,085) X 5 = PGAg 0,42. Dit werd in 2015 verlaagd tot 4 X zo zwaar als de Huizinge beving = PGAg 0,36 .

Het is ook mogelijk dat er, bij de bepaling van de onzekerheden in de toekomst, ook rekening gehouden werd met het injecteren van water voor aardwarmte exploitatie, CO₂ opslag, zoutwinning, of met fracking van de onderliggende steenkoollaag. Waterinjectie zou als smering tussen de breukvlakken kunnen fungeren, terwijl het onttrekken van gas uit de onderliggende steenkoollaag fracking een andere golf van compactie en aardschokken zou kunnen opleveren. Zoutwinning uit de bovenliggende zoutlaag ook. Allemaal onzekerheden.

Aardbevingsbestendig - Verbouwen

Het verbouwen²⁴ van de hoofdconstructie volgens de Ontwerprichtlijn voor Aardbevingsbestendig bouwen moet gebeuren op basis van de NPR9998. Het zoneringskaartje van de provincie Groningen werd in de september ontwerpversie NPR9998:2017 vervangen door een grondslag typologieënkaart die de bovenste 30 m definieert. Deze bovenste grondlaag, inclusief het grondwater, is namelijk bepalend voor de versnelling van het aardoppervlak ten gevolge van een schok in het hypocentrum; de schuifgolfsnelheid ($V_{S,30}$). De rekenwaarden zullen per locatie en dus per grondsoort verschillen. De nieuwste NPR9998:2020 met de Home Webtool C1:2020 wordt nu als verplichte rekenmethode doorgevoerd. Ook deze laatste NPR blijft aan de hoge (conservatieve) kant en blijft afhankelijk van de ontwikkeling van de resterende activiteiten in de ondergrond. Door de dikke taaie laag Zechstein zullen druk- en hoogteverschillen in het reservoirgesteente langzaam genivelleerd worden. De kleine oppervlakte trillingen zullen daarom nog enige tijd voortduren.

²¹ Zie ook : https://www.nen.nl/media/PDFies/Achtergronddocument_NPR_9998_webtool_module_7_2020-07_update_2021-01.pdf

²² De NAM en de NCG eisten echter wel dat de ingenieurs met deze hoge normen gingen rekenen.

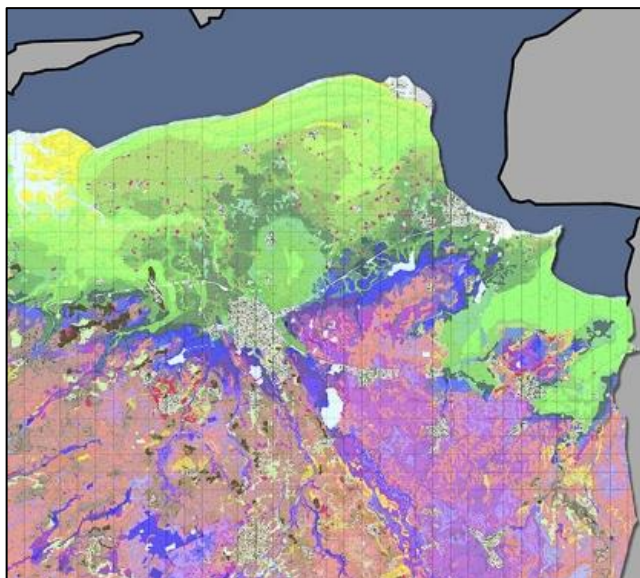
²³ De term 'vastgesteld' wordt hier gebruikt omdat er geen berekeningen aan te pas kwamen. Men nam eerst de 2,5 veiligheidsfactor voor engineeringprojecten en vermenigvuldigde dat maar met 2 voor extra veiligheid.

²⁴ De terminologieën 'Veiliger maken, Bouwkundig versterken en Aardbevingsbestendige (ver)bouw' werden door de Minister van Economische Zaken op 15-8-2015 aangegeven middels een brief aan de dialogtafel.

Figuur 1-9. Het bijgaande bodemkaartje van de provincie Groningen en omgeving. Dit geeft de belangrijkste grondsoorten aan. Dit kaartje uit de NPR-2017 met de schuifgolfsnelheid $V_{s,30}$ neemt de grondsoorten mee tot op een diepte van 30 m.

De groene en lichtgroene gebieden (kleigronden) geven in de NPR kaart de hoogste waarden voor $V_{s,30}$ en dus ook voor de PGAg.

De paarse, vastere gronden geven een lagere waarde voor de $V_{s,30}$, waardoor de bevingen ook minder sterk zijn en korter kunnen duren.



Als voor het verbouwen van bestaande bouw “slechts” het huidige Bouwbesluit 2012 van toepassing zou zijn, dan zullen voor oude gebouwen van vóór de bouwwetgeving van 1992 meestal versterkingen nodig zijn om aan de normwaarde van de NPR9998 te voldoen²⁵.

Daarnaast zullen bij een grote verbouwing of renovatie ook verplichte verduurzamingsmaatregelen moeten worden toegepast²⁶. In Nederland is per januari 2021 de BENG (Bijna Energie Neutraal Gebouw) van toepassing. De BENG eisen definiëren een bepaald maximum aan energieverbruik per m² gebruiksovervlak van het gebouw. Zie verder tabel onder BENG.

Om een jaren 1970 rijtjeswoning in de provincie Groningen van 120 m² seismisch te versterken (waarde < € 100.000) naar de NPR9998 is wellicht € 100.000 nodig, waarbij dan de versterkte muren dan geïsoleerd moeten worden. Om deze woning verder te isoleren (vloer/dak, ramen) en te verduurzamen volgens de 2021 BENG norm is wellicht nog eens € 50.000 nodig. Deze extra kosten zal de woningeigenaar vaak niet kunnen opbrengen, waardoor de woning voor de langere termijn niet verduurzaamd wordt, alleen wat sterker.

Het resulterende gebouw (zonder de grondwaarde) heeft dan na deze ingrepen²⁷ een marktwaarde van < € 150.000. Wanneer de versterkings- en verduurzamingskosten meer dan 50% hoger worden dan de marktwaarde van die woning, zal dat een reden kunnen zijn om voor sloop en nieuwbouw te kiezen. De daardoor ontstane materiaalvernietiging en extra CO₂ uitstoot is wel onlogisch wat betreft de nationale duurzaamheidsambitie.

Oudere gebouwen van vóór de 1900 eeuwwisseling zijn soms monumenten en mogen aan de buitenzijde vaak niet aangepast worden. Om monumenten volgens de NPR9998 te versterken zijn langdurige goedkeuringstrajecten van toepassing; meestal komt men dan uit op het kostbare *Base-isolation*. Gebouwen van vóór 1900 en ‘op staal’ gefundeerd, hebben vaak hoge ramen en zijn met losse houten vloeren seismisch gesproken erg zwakke constructies. Dit betekent het dat er aanzienlijke versterkingen moeten worden toegepast, te beginnen bij de fundering, de draagmuren, vloerdiafragma’s, tot en met de kap en de schoorstenen. Ook als er een esthetische waarde aan het

²⁵ Sinds 1965 was er de model-bouwverordening van de Vereniging Nederlandse Gemeenten die in 1992 integraal werd herzien, onder andere de windbelasting die mede bepalend is voor de gebouwsterkte.

²⁶ Zie <http://www.hebbes.be/artikel/nieuwe-regels-2015-voor-kopen-en-verbouwen> Nog niet geldig voor Nederland, wel voor nieuwbouw: http://atriensis.nl/nieuws//459/strengere_eisen_isolatie_nieuwbouw_gevolgen_bij_renovatie

²⁷ In sommige situaties kan er binnenzijdig geen versterking worden aangebracht vanwege de indeling. Bijvoorbeeld als er een trappenhuis en toilet tegen de bouwmuur aanzit. In dat geval moet het hele grondplan van de woning worden veranderd. In andere situaties, bij kleine woningen, kan er na de versterking en isolatie geen bed van 2m meer in de kleinste slaapkamers.

gebouw wordt toegekend (bijvoorbeeld bij beschermd stadsgezicht of gemeentelijk monument) wordt dit vaak economisch als niet-rendabel aangemerkt²⁸.

Veruit de meeste gebouwen in de provincie Groningen hoeven anno 2020 niet meer versterkt te worden als ze slechts hoeven te voldoen aan het **net-niet-instortingsgevaar** (*Near Collapse*) volgens de NPR. De Home Webtool-waarden zijn in 2020 nog steeds conservatief met tussen de 50% en 100% boven de werkelijke belastingwaarde. Bij het stopzetten van de gasexploitatie zullen er zich geen grotere schokken voordoen dan de klap van 16 augustus 2012 in Huizinge (Richter 3,6 met PGAg 0,085).

Volgens de NPR is er dan geen veiligheidsprobleem, maar bij kleine schokken kunnen dan nog wel weer scheuren of herhaalschade optreden. Er is dus een aanzienlijk verschil tussen 'versterken' volgens de NPR, en 'versterken' volgens de behoefte van de bevolking.

Figuur 1-10. Doorzonwoningen en rijtjeswoningen zonder brede raampenanten.

Op begane grond zijn geen momentsterke vloer-muur verbindingen in de lengterichting van het gebouwenblok. Hierdoor behoort dit type woningen tot de zwakste gebouwcategorieën. Voor alle soorten gebouwen zijn goede versterkingsmethoden beschikbaar, maar economische factoren spelen mee in de besluitvorming.



Figuren 1-11. Deze twee oudere gebouwen behoren tot de zwakste types.

Links. De begane grond etage met hele smalle raampenanten en hoge ramen en zonder binnenmuren die de dwarsbelasting kunnen opnemen. Het seismisch verbouwen volgens de NPR-waarde kost meer dan de marktwaarde na verbouwing, tenzij het mogelijk is om een goedkope Base-isolation methode toe te passen.

Rechts. Deze oude boerderij werd door de NAM aangekocht. Voor monumenten en beeldbepalende gebouwen geldt een versterkingsbudget van 150% t.o.v. de herbouwkosten. De marktwaarde is dan in principe niet van belang. Het op Base-isolation zetten van een dergelijk gebouw kan een paar miljoen euro kosten.

²⁸ 'Economisch rendabel' wordt hier gebruikt in de zin van zelfde bouwvolume en gebruiksfunctie van het gebouw dat voor dezelfde prijs wordt gerealiseerd. Dit geldt niet voor belangrijke historische gebouwen zoals rijksmonumenten. In de berekeningen wordt duurzaamheid of CO₂ uitstoot zelden meegerekend.

In deze alfabetische lijst of de andere technische hoofdstukken wordt geen interpretatie gegeven van verschillende standpunten of kosten van het versterkingsproces, de te volgen procedures of de regelgeving van de NCG, omdat hierover de meningen sterk uiteenlopen.²⁹

Aardbevingsbestendig versterken

Dit is het proces van het versterken van een bestaand gebouw, op een zodanige manier dat het de theoretisch maximale aardbeving kan doorstaan zonder gedeeltelijk in te storten (*Near Collapse*). De aardbevingen mogen niet veel menselijke slachtoffers veroorzaken, ten gevolge van het instorten van gebouwonderdelen of het hele gebouw. Scheuren voorkomen hoort daar niet bij, dat is zo vastgelegd in de ACI-317 en de Eurocode 8, beiden de basis van de NPR9998. De terminologie “versterken” is een daardoor rekbaar begrip. Het betreft hier het gehele gebouw inclusief hoofddragconstructie, de primaire constructie onderdelen, maar ook de secundaire onderdelen.

Het zijn de secundaire onderdelen zoals bijvoorbeeld zware schoorstenen op flexibele kapconstructies of topgevels die het eerste de aandacht vragen omdat deze bij lichte aardbevingen of schokken kunnen omvallen³⁰. Dit worden hoog-risico-elementen genoemd. Om schade aan oude zwakke brosse bakstenen woningen te voorkomen is alleen *Base-isolation* een afdoende oplossing.

Het principe “schadevrij wonen”, wat de bevolking wil, vereist meestal een meer uitgebreide en daardoor duurdere versterking dan seismisch versterken, of de toepassing van *base-isolation*, waardoor de aardbevingskrachten op de tweede fundering van het gebouw zeer sterk worden verminderd³¹. ‘Schadevrij’ bij op de vaste grond gebouwde in brosse baksteen gemetselde gebouwen is als doelversterking bijna onhaalbaar, tenzij men gewapend metselwerk door het hele gebouw heeft. Dit komt in Nederland nauwelijks voor en is ook achteraf onmogelijk om door te voeren.

Figuur 1-12. Effect op een zwak huis zonder en met Base-isolation. Het hele gebouw scheurt rondom alle openingen (gevaar). Door de Base-isolation komen er slechts lichte krachten op de bovenliggende constructie (veilig). Hoofdstuk 5 gaat dieper in op het thema Base-isolation.



Voor het versterken van het gebouw moet er eerst een analyse gemaakt worden van de huidige constructie en de kwaliteit van de funderingsbasis (‘op staal’ of op heipalen). Van veel oude gebouwen zijn vaak geen bouwtekeningen beschikbaar zijn, of er zijn interne aanpassingen gemaakt. Aan de hand van de analyse en de NPR moet er een voorstel gemaakt worden dat niet alleen met de eigenaar overlegd moet worden, maar ook met BoWoTo en eventueel Monumentenzorg.

In een verbouwingsplan moeten de diverse verduurzamingsaspecten worden meegenomen zoals thermische isolatie van de gehele buitenschil. Wanneer een gebouw een aanzienlijk **eigen gebrek** heeft, zal met de eigenaar over de kosten van het herstel van dat eigen gebrek overlegd moeten

²⁹ Zie bijvoorbeeld: <https://www.nationaalcoordinatorgroningen.nl/binaries/nationaal-coordinator-groningen/documenten/rapporten/2020/06/24/critical-review-over-de-benutting-van-kennis-in-de-versterking/Critical+review+Benutting+van+kennis+in+de+versterking.pdf>

³⁰ Bij het wegnemen van hoog-risico elementen zoals bijvoorbeeld een schoorsteen, inclusief het verlagen van de gebouwmassa of het maken van een dilatatie, wordt op een directe wijze het schaderisico verminderd. Relatief gesproken wordt daarmee het gebouw versterkt; dit is een basisaspect van gebouwversterking.

³¹ De Groningse bevolking wil echter helemaal geen schade, en zeker niet versterking tot slechts het *Near Collapse* principe. Het verschil tussen de wetgeving (*Near Collapse*) en ‘geen schade’ is voor de meeste bewoners helemaal niet duidelijk. Het bijkomende probleem is dat de stijve en dunne baksteenconstructies in Nederland totaal niet aardbevingsbestendig zijn en meteen al bij kleine schokken scheurschade oplopen.

worden³². Bij een seismische versterking tot de erg hoge NPR9998:2015-norm, of voor het scheurbestendig maken zal bij veel woningen de bewoner niet in het gebouw verblijven en zal er tijdelijk een alternatief onderdak nodig zijn (extra kosten). Bij elkaar zal het aardbevingsbestendig versterken of scheurbestendig maken van een gebouw vaak meer tijd en kosten vergen dan slopen en het neerzetten van een duurzame (geïsoleerde) en sterkere nieuwbouw (lichter en ductiel zoals houtskeletbouw).

Woningwetwoningen die gedurende de eerste 25 jaar na de oorlog werden gebouwd zijn zelden geïsoleerd en hebben kleine binnen afmetingen. Ook als ze ondertussen met dubbel glas en spouwmuurisolatie zijn voorzien, is de combinatie seismisch versterken en verduurzamen volgens de hoge normen en economie van een consumptiemaatschappij duurder dan slopen en nieuwbouw.

Figuur 1-13. In de wijk Opwierde-Zuid in Appingedam. Sloop van 233 woningen.

Foto: Gea v Loon, 9-1-2020. Dagblad v Het Noorden.



Nieuwe constructies worden volgens de bouwnormen met een zekerheidsmarge uitgerekend, waardoor ze ongeveer 30% tot 50% sterker zijn dan het bezwijkpunt van die rekenwaarde. Bij tektonische aardbevingen is de maximale PGAg eveneens een hoge schatting met een extra zekerheidsmarge. Voor de retrofitting (seismisch versterken) van bestaande gebouwen met nieuwe constructies wordt in tektonische gebieden vaak verplicht dat te zwakke gebouwen (hoog risico van instorten bij de maximale PGA) worden versterkt tot 50% of 2/3 van de gewenste normsterkte. Dat wil echter niet zeggen dat voor geïnduceerde aardbevingen dezelfde regels van toepassing zijn.

Aardgas of methaan

Een fossiele energiebron (Methaan = CH₄) die 350-280 miljoen jaren geleden is ontstaan door de opstapeling van een meer dan honderden meters dikke laag plantenresten in moerassen. De verterende planten, waar geen zuurstof bij kwam, produceerden door bacteriën methaangas³³. De grote hoeveelheid methaan veroorzaakte een heel sterke opwarming van de aarde en daarna veel woestijnvorming en miljoenen jaren zandverstuivingen. De verterende plantenmassa werd onder Groningen eerst afgedekt door een 200 m dikke zandlaag, waardoor er veel methaangas in die zandlaag zat en ook het methaangas aan de bovenkant ontsnapte. Door de zoute opdrogende zee werd die zandlaag afgedekt door één km dikke zoutlaag (na het overstromen, verdamping van de ondiepe Zechsteinzee). Tenslotte door twee km dikke andere grondlagen zoals zeeklei en zand, waardoor de bovendruk op het zandsteen opliep tot 670 bar.

³² Een gebouw van rond 1900 werd echter op basis van andere normen gebouwd dan van nu; dat is weliswaar geen eigen gebrek (juridische term uit de verzekeringswereld), maar het gebouw werd in de tussentijd ook niet aangepast aan de nieuwere bouwnormen. Zie 'eigen gebrek' voor verdere uitleg.

³³ Methaangas is >21x sterker broeikasgas dan CO₂. Het effect was een zeer sterke opwarming van de aarde.

Figuur 1-14. Artiëst impressie van het soort plantengroei.

Dit was een paar honderd miljoen jaar geleden, die de bron is van de vorming van aardgas, steenkool en olie. Dat is nog ver vóór het bestaan van de dinosaurussen of gewervelde dieren. (Internetfoto).



Door de grote druk van deze zout- en aardlagen en resulterende hoge temperatuur is dit onderste plantmateriaal (onder het zandsteen) langzaam veranderd in steenkool. Deze steenkool laag ligt onder een groot deel van Europa en zit in Limburg dicht bij het oppervlak. Het uit de planten- en steenkool laag ontsnappende methaangas is onder de afsluitende zoutsteenlaag in het zandsteen blijven zitten. Het pure aardgas (hoofdzakelijk methaan) is geurloos, licht ontvlambaar en dodelijk bij inademing. Het aardgas kan vermengd worden met methaangas (CH₄) uit bio-vergisters en met waterstofgas (uit overproductie elektriciteit). Deze vermengingen zullen in de toekomst toenemen. Zie ook <http://nl.wikipedia.org/wiki/Aardgas>

Accelerometer

Ook wel trilling-meter of versnellingsmeter genoemd. Zie ook 'Seismometer'. Om de gebouwtrillingen nauwkeurig vast te kunnen leggen moet de accelerometer een hoge Hertz-waarde hebben (500 Hz). Eenvoudige meters hebben vaak een 100 Hz registratie die slechts elke 1/100^{ste} seconde een positie registreert. Om de kortdurende geïnduceerde aardbevingen in verschillende richtingen te kunnen analyseren worden accelerometers van 500 Hz gebruikt.

Figuur 1-15. In de provincie Groningen zijn sinds 2014 honderden accelerometers aan de funderingen van gebouwen bevestigd, die van de drie soorten trillingen (X en Y = 2 horizontaal loodrecht op elkaar en 1 verticaal = P) signalen sturen, die via een netwerk met een centrale metingkamer zijn verbonden.

Om te voorkomen dat een meter ook het dichtslaan van een zware deur registreert, wordt een trilling pas naar de centrale doorgestuurd wanneer deze door drie meters wordt waargenomen.

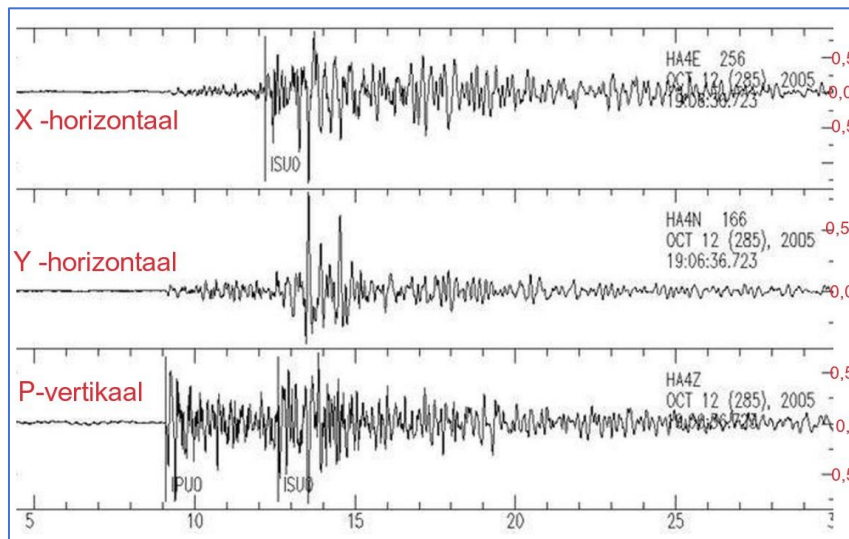


Elke beving wordt precies met, richting en sterkte in kaart gebracht. De versnellingsmeter meet de drie PGAg's (twee horizontaal X en Y en een verticaal Z) als de belangrijkste waarden ter bepaling van de aardbevingssterkte³⁴. Ze registreren pas als verschillende meters tegelijkertijd afgaan, dus niet als iemand in een woning de deur hard dichtgooit. De NAM heeft ook enkele paar diepte-geophones (boorgatmeters) geïnstalleerd die de grondversnelling op dieptes tot 2 km meten.

³⁴ Zie ook het kaartje op: <http://rdsa.knmi.nl/opencms/nl-rssm/>.

Figuur 1-16. Registratie van een voelbare aardbeving. Dit gaf een knal en het huis kraakt)³⁵ van 12 oktober 2005 te Smilde bij Assen. Mw 2,5 en PGAg \approx 0,06.

De P-schok komt het eerste boven, daarna de horizontale schokken. Afhankelijk van de afstand tussen het epicentrum en de meter is de registratie anders.

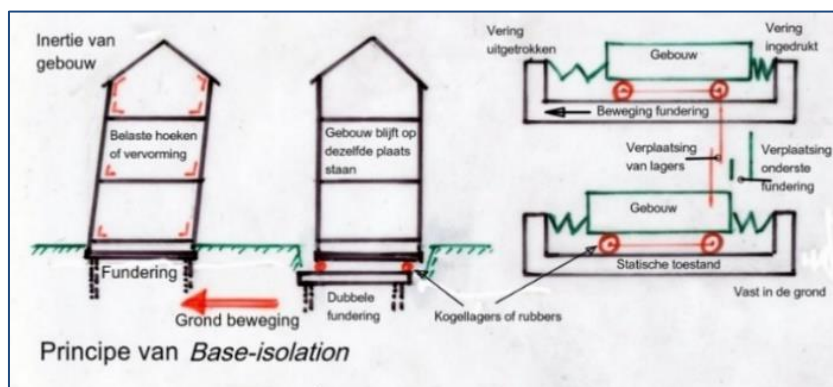


Er bestaan andere meetinstrumenten zoals tilt-meters die heel precies de kanteling van een constructie kunnen meten. Deze kunnen aanvullende informatie leveren zoals het verzakken van een gebouw. Door verschillen van hoekverdraaiing over een langere periode te meten en de trillingen, zou men kunnen constateren of er door de trillingen verzakkingen of ongelijke zettingen in funderingen zijn ontstaan. Deze tilt-meters worden bijvoorbeeld in Amsterdam gebruikt bij de Metro aanbouw, maar er zijn er ook een aantal in Groningen geplaatst. De NCG heeft bij wijze van proef sinds 2017 een aantal tilt-meters geplaatst zoals bijvoorbeeld in dijklichamen.³⁶

Base-isolation (*Base-isolation*)

Het principe van 'Base-isolation' is dat het gebouw constructief is losgekoppeld van de onderste fundering (*base*) op een zodanige manier dat de horizontale aardbevingsbewegingen van de grond niet direct op het bovenliggende gebouw worden overgedragen. Hierbij wordt gebruik gemaakt van rollers of series van gestapelde metalen/rubberen platen. De methode wordt veelvuldig toegepast bij grote gebouwen en monumenten in aardbevingsgebieden en is gemakkelijk aan te brengen bij nieuwbouw omdat daar niet onder het bestaande gebouw twee funderingen aangelegd hoeven te worden.

Figuur 1-17. Base-isolation principe schets. De rollen met veren, rollen in een kom of elastische rubbermetaal pakketten zorgen ervoor dat het gebouw weer terugkeert naar het centrum van de oplegging. Doordat de gebouwmassa een inertie heeft, beweegt de grond samen met de onderste fundering los van het bovenstaande gebouw.



Het gebouw ondervindt slechts een kleine zijwaartse belasting t.g.v. de veerwerking en geen kantel effect. Het krijgt daardoor erg weinig belastingen op de verbindingen tussen muren en vloeren of daken. Het type *Base-isolation* hangt af van de gebouwmassa en de horizontale verplaatsing van de maximale aardbeving.

³⁵ <https://www.knmi.nl/over-het-knmi/nieuws/aardbeving-bij-smilde-drenthe>

³⁶ <https://www.rtvnoord.nl/nieuws/181057/Nationaal-Coordinator-Groningen-start-proef-met-tiltmeters>

Bij de geïnduceerde aardbevingen in Groningen is de horizontale verplaatsing erg klein (bij PGAG <0,1 is de afstand \approx 1 cm) vergeleken met tektonische aardbevingen die soms decimeters bedragen. De eerste toegepaste *Base-isolation* mechanismen waren geschikt voor een horizontale gebouwverplaatsing van meer dan 20 cm, gebaseerd op de NPR9998:2015. *Base-isolation* voor de provincie Groningen vereist een zeer licht lopend systeem dat slechts een kleine zijwaartse beweging hoeft te overbruggen.

Een *Base-isolation* absorbeert meestal niet de verticale trillingen of belasting van de grond op het gebouw. Omdat de Nederlandse woningbouw wel berekend is op verticale belasting is voor de kleine verticale schokken geen extra versterking nodig. Verticale trillingen kunnen wel zetting in de grond en de fundering veroorzaken en kunnen daarom tot scheuren leiden. Een belangrijke voorwaarde van *Base-isolation* is dan ook dat er zich absoluut geen zettingen van de fundering mogen voordoen.



Figuren 1-18. Links: Rijksmonument Zeldenrust molen (Internetfoto van R. Bakker)³⁷

Molen te Westerwijtwerd. Een windmolen is in principe heel erg goed bestand tegen trillingen uit alle richtingen en heeft een flexibele houten bovenbouw. Een *Base-isolation* hiervoor is daarom seismisch gesproken niet nodig.

Het plaatsen van deze molen op een *base-isolation* was hoofdzakelijk een technische exercitie of een soort test om *Base-isolation* uit te proberen, meer dan een maatregel om het gebouw tegen de aardbevingen te beschermen. In principe staat de hele molen te trillen als de wieken in de wind draaien en is de dikke stenen basis van het gebouw solide uitgevoerd, terwijl de bovenbouw van houtbouw juist flexibel is.

In 2014 werd voor verschillende gebouwen overwogen om deze op *Base-isolation* te zetten omdat dit goedkoper zou zijn dan het gehele gebouw te versterken, of omdat monumenten niet aan de buitenkant of aan de binnenkant seismisch versterkt mochten worden. Zo werd er een nieuwe lagere schoolgebouw op rubberen blokjes *Base-isolation* gebouwd. Voor scholen of andere gebouwen waar veel mensen samenkomen (gebouwklasse, *consequence class CC3*) is een hogere zekerheid (veiligheid) nodig dan woningbouw en daarom wordt er voor dit **type CC3 met hogere belastingen** gerekend.

De kosten van *Base-isolation* zijn relatief erg hoog voor kleine en lage gebouwen in vergelijking met hoge gebouwen vanwege de noodzakelijke dubbele fundering en ter voorkoming van enige verzakking van die funderingen. Voor bestaande gebouwen is het heel véél duurder aanleggen dan voor nieuwbouw, soms meerdere malen duurder dan de hele gebouwwaarde. Hoofdstuk 5 gaat dieper in op *Base-isolation*.

³⁷ Zie artikel met foto van stervormige metalen constructie: <https://www.dvhn.nl/groningen/Een-primeur-rubber-bescherm-t-molen-Zedenrust-in-Westerwijtwerd-tegen-bevingen-21036894.html>

Belangrijkeheidsfactor

Importance factor. Building classification. {Eurocode 8: 1.4.2.11}

Deze wordt aangegeven door factor γ_1 (gamma), waarmee de belasting wordt vermenigvuldigd bij hogere of lagere belangrijkheid van de bouwconstructie ten opzichte van de standaard. Deze classificatie komt ongeveer overeen met de belangrijkheidsklassen van de NEN-EN 1998-1. Hoe belangrijker een gebouw is, hoe groter de vermenigvuldigingsfactor. **De vermenigvuldigingsfactor verhoogt de veiligheid van het gebouw.** Dit is belangrijk voor gebouwen waar veel mensen of dieren aanwezig kunnen zijn, en in combinatie met tektonische aardbevingen, omdat men daar niet met zekerheid kan zeggen hoe sterk de maximale aardbeving zal zijn.

Gevolklasse ³⁸ <i>Consequence classes (=CC)</i>	Belangrijkeheidsfactor γ_1	
	Nieuwbouw	Verbouw en afkeuren
CC1A. Geringe kans en kleine of verwaarloosbare gevolgen zoals bij agrarische gebouwen, <u>geen</u> menselijke bewoning. ³⁹	a	b
CC1B: Als boven <u>met</u> menselijke bewoning.	1,3	1,2
CC2. Gemiddelde kans of aanzienlijke gevolgen, woningen of kantoorgebouwen.	1,5	1,4
CC3. Grote kans of grote gevolgen, belangrijke gebouwen, stadions, publieke gebouwen.	1,7	1,6
<p>a. Voor CC1A worden aardbevingsbelastingen verondersteld niet maatgevend te zijn. Desgewenst kan echter voor nieuwbouw een belangrijkheidsfactor van $\gamma_1 = 0,8$ worden aangehouden.</p> <p>b. Voor CC1A worden aardbevingsbelastingen verondersteld niet maatgevend te zijn. Desgewenst kan echter voor nieuwbouw een belangrijkheidsfactor van $\gamma_1 = 0,6$ worden aangehouden.</p>		

Appartementengebouwen, zoals portiekwoningen met maximaal twee verdiepingen of drie bouwlagen vallen onder CC1B. Met vier bouwlagen vallen deze appartementen onder CC2.

Gebouwen en installaties die een belangrijke functie hebben tijdens en direct na een aardbeving, hebben ook een hoge categorie. Communicatieapparatuur is een dergelijk voorbeeld. Installaties die veel schade kunnen veroorzaken eveneens; b.v. chemische installaties met gevaarlijke stoffen. Niet alleen de veiligheidsfactor CC wordt verhoogd, maar voor veel gebouwen wordt ook de risicofactor verlaagd van 10^{-5} tot 10^{-6} (=veiligheidsfactor verhoogd) zoals bijvoorbeeld voor chemische bedrijven en zeedijken. Grote woongebouwen hebben volgens de bovenstaande lijst ook een verhogingsfactor, waardoor ze sterker moeten worden uitgevoerd.



Figuren 1-19. Verschillende gebouwvormen met andere gevolgklasse.

Links: CC1B, drie woonlagen.

Midden: CC1B drie woonlagen.

Rechts: CC2, vier woonlagen

In de middelste situatie zijn er wel vier bouwlagen, maar de onderste is niet bewoond (dit zijn garageboxen), hierdoor zijn er maar drie bouwlagen bewoond en is CC1B van toepassing.

³⁸ Zie: [http://www.stufib.nl/images/bestanden/presentaties/verg%2070%20-%202011-003-2009%20\(TU%20Delft\)/stufib_11_maart_2009_EC0_Braam.pdf](http://www.stufib.nl/images/bestanden/presentaties/verg%2070%20-%202011-003-2009%20(TU%20Delft)/stufib_11_maart_2009_EC0_Braam.pdf) en <http://www.stichtingibk.nl/wp-content/uploads/2013/12/ibk-2014-04-Definitie-Risicoklasse-1.pdf>

³⁹ Bij 'veel' vee kan men beargumenteren dat een agrarisch gebouw gevolgklasse CC1B heeft met als gevolg de belangrijkheidsklassen van respectievelijk $\gamma_1 = 1,3$ en $\gamma_1 = 1,4$. De definitie van 'veel' is echter niet gegeven.

BENG. Bijna Energie Neutrale gebouwen

De relatie tussen de oudere EPC-normen en de 2021 BENG-normen wordt aangegeven in de onderstaande tabel en per normperiode. Zie ook Hoofdstuk 12 Verduurzamen.

Het document NTA 8800:2019-06/INT-V1:2020⁴⁰ geeft de interpretatie van de nieuwe BENG-normen⁴¹ 1, 2 en 3 die gelden per 1 januari 2021 en betreft de hoeveelheid energie dat een gebouw mag verbruiken per oppervlakte-eenheid per jaar. Met nieuwbouw en **grote verbouwingen**⁴² moeten gebouwen aan deze norm voldoen waarbij de isolatie van de buitenschil een belangrijke factor is⁴³.

Bij Beng 1 is: Buitenschil gedeeld door woonoppervlak bij grondgebonden woningen = $Als/Ag \leq 2,2$. Bij structurele aanpassing zoals het seismisch versterken dient deze norm gevolgd te worden, waarbij de versterkingsconstructies geen warmtelekken mogen veroorzaken. Het gebouw aanpassen om scheuren te voorkomen en tegelijkertijd isoleren zijn ook twee grote aanpassingen.

Bouwjaar	Rc-muur m ² .K/W	Rc-dak m ² .K/W	Rc-vloer m ² .K/W	Dikte isolatie	Rc-glas m ² .K/W	Energie label Letter	Punt score	EPC rekenfactor	BENG 1 kWh/m ² .jr	BENG 2 kWh/m ² .jr fossiel	BENG 3 kWh/m ² .jr hernieuw
								0,0	0		
		10,		30 cm		A++++	51-61	0,1	≤ 15	0	> 50%
		8,0		28 cm		A+++	41-50	0,2 < EPC ≤ 0,4	≤ 30	0 < 50	> 50%
		6,5		17 cm		A++	31-40	0,4 < EPC ≤ 0,6	≤ 70	30 < 50	> 40%
2021	4,7	6,3	3,7	15 cm		A+	21-30	0,6 < EPC ≤ 0,8			
2015	4,5	6,0	3,5	13 cm	1,2	A	2-20	0,8 < EPC ≤ 1,1			
2005	2,5	2,5	1,3	8 cm	0,6	B	< 2	1,05 < EPC ≤ 2			
1992	2,5	2,5	1,3	8 cm	0,5	C		1,4-1,8			
1987	2,0	2,0	1,3	5 cm	0,5	D		1,8-2,1			
1982	1,3	1,3	1,3	3 cm	0,5	D		1,8-2,1			
1976	0,7	1,0	0,3	2 cm	0,5	E		2,1-2,4			
1965	0,43	0,86	0,17			F		2,4-2,7			
<1930	0,35	---	---			G		< 2,71			

Overzicht van de ontwikkeling van de Nederlandse isolatienormen, het energielabel, de EPC-waarden en de BENG-eisen. Waar de EPC een dimensie loos getal is (dus zonder kWh of joule), kijkt BENG wel naar het energieverbruik, namelijk in kWh per vierkante meter per jaar. En stelt ook een maximum aan de hoeveelheid energie die een gebouw nodig heeft voor verwarming en koeling.

De energie eisen van gebouwen zijn over de jaren verhoogd, te beginnen met de oliecrisis in de jaren 1971-1973 en werden steeds strenger naarmate er meer belang werd toegekend aan het milieu en de CO₂ uitstoot t.g.v. het verwarmen van de gebouwen. In 2020 is ongeveer 40% van de nationale energieconsumptie gerelateerd aan de bouw (incl. transport, infrastructuur en sloop) waarbij bijna 1/3^{de} noodzakelijk is voor verwarmen en koelen van gebouwen.

Betere isolatie van de buitenschil van het gebouw is daarom een kernelement in duurzaam bouwen. Isoleren en bezuinigen!

Omdat de provincie Groningen al sinds tientallen jaren een krimpgebied is, werd er door de bewoners weinig geïnvesteerd in de gebouwde omgeving en werd er relatief weinig nieuwbouw gerealiseerd in vergelijking met de randstad. Hierdoor heeft een groot gedeelte van de woningen slecht onderhoud, slechte thermische isolatie en zullen de verbouwkosten naast de seismische versterking aan de hoge kant zijn. Financieringsmodellen voor verduurzaming moeten daarop aangepast worden.

⁴⁰ Zie: https://www.gebouwenenergieprestatie.nl/app/uploads/sites/8/2020/01/NTA_8800_interpretatiedocument_20200106.pdf

⁴¹ BENG Eisen <https://www.duurzaamgebouwd.nl/artikel/20181214-beng-is-veranderd-maar-wat-betekent-dat-nu-echt?>

⁴² Het seismisch versterken is zowel een grote verbouwing als een aanpassing van de constructie. In sommige documenten wordt als grote verbouwing aangegeven dat het 25% van de buitenschil moet zijn.

⁴³ Zie ook: <https://www.bouwwereld.nl/bouwkennis/beng-vereist-goede-uitvoering-van-isolatie/>

Biogas, methaangas

Dit is hoofdzakelijk (>60%) methaangas (CH₄) dat wordt verkregen door vergisting van mest van vee, landbouwafval en resten van de voedselindustrie. Het is belangrijk dat mest en urine gescheiden blijft en de mest niet in de grote natte mestkelders verdwijnt, maar direct in de biogas reactor of biovergister wordt gebracht. Andere gassen, waterdamp en elementen moeten uit het gas gezuiverd worden voordat dit opgewaardeerde aardgas in het gasnet kan worden toegevoegd⁴⁴.

Figuur 1-20. Internetfoto. Biogasinstallatie van www.Host.nl met twee grote opslagcontainers. Het biogas moet gezuiverd worden en kan verbrand worden voor energie ('s nachts als er geen zon is) en er kan LNG van gemaakt worden, voor vrachtwagens.

CH₄ = 21 x zo belastend of isolerend als CO₂ in klimaatopwarming. Wanneer je 1 x CH₄ verbrand blijft er slechts 1 x CO₂ over en warmte of energie. Je verwijdert dan 20 x CH₄.



Bodemdaling (Komvorming)

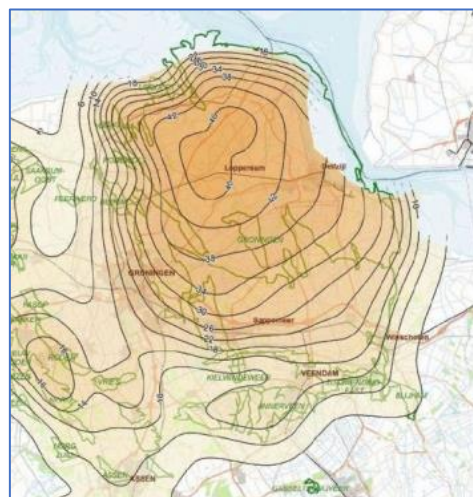
Bodemdaling of zakkings is de daling van het grondoppervlak door oxidatie (van veen), zetting of geologische processen (gasextractie en compactie). Het zakken van het niveau van de bodem ten opzichte van een vast referentiepunt, bijvoorbeeld het Normaal Amsterdams Peil (NAP).

De grondwaterstand wordt door bodemdaling langzaam beïnvloed en daardoor kunnen funderingen nat worden wanneer de grond met de gebouwen zakt. Om het grondwater op hetzelfde peil te houden wordt plaatselijk water weggepompt, waardoor andere funderingen droog kunnen komen te staan.

Figuur 1-21. Het NRP9998:2015 kaartje geeft de geschatte maximale bodemdaling.

*Deze daling is **na 50 jaar** ten gevolge van de gasexploitatie, met ongeveer 60 cm in de gemeente Loppersum. Hier is de porositeit van het gas houdende zandsteen het grootste en daardoor ook de samen-persing bij het verminderen van de inwendige gasdruk. Deze daling wordt reeds tientallen jaren precies gemonitord, ook via satellietmetingen.*

Daarnaast is er een landelijke bodemdaling ten gevolge van veen, ontwatering en uitdroging en een geologische daling in de Peelslenk.



⁴⁴ In 2013 is er een voorstel gedaan om de Groningse veeteeltboeren te stimuleren om over te stappen op biogas. Dat zou enerzijds een kleine maar duurzame aanvulling opleveren voor het gasnet, maar anderzijds ook een stimulering voor de lokale industrie en werkgelegenheid. In 2013 was de technologie voor het zuiveren van biogas verbeterd en goedkoper geworden met osmose. De veeteeltsector is een hele grote factor in de CH₄ (en daarmee CO₂) uitstoot en opwarming van de aarde. Daarnaast produceert de veeteelt heel veel uitstoot van stikstofverbindingen vanwege de vermenging van poep en urine, en milieuschade door het uitrijden van de gier op het land, waardoor de biodiversiteit vermindert.

Bij houten paalfunderingen kan het periodiek droogvallen tot houtrot leiden, waardoor gemetselde funderingen op die paalfundering flinke schade kunnen oplopen. Bodemdaling en daarna bemaling⁴⁵ kan dus bij houten paalfunderingen indirect leiden tot grote gebouwschade. Bij veen- en kleigronden kan door uitdroging ook krimp ontstaan, waardoor zettingen in de fundering kunnen ontstaan met scheurvorming als gevolg.

Bodemdaling commissie

De Commissie Bodemdaling van de NAM stelt vast welke maatregelen redelijkerwijs noodzakelijk zijn om schade ten gevolge van bodemdaling door aardgaswinning te voorkomen, te beperken of te herstellen. Verder bepaalde deze Commissie welke kosten de NAM zou vergoeden⁴⁶. www.commissiebodemdaling.nl. Zie ook statusrapport 2020⁴⁷ met prognoses tot 2080. Hierin staan nieuwe prognosekaartje voor 2030 met een totale bodemdaling van 38 cm in de gemeente Loppersum, echter met een geschatte onzekerheidsfactor van 2,5.

Ten gevolge van de bodemdaling zijn grote kosten gemoeid die verband houden met het reguleren, c.q. het herstellen van de grondwaterstand ten behoeve van de veeteelt en landbouw. In het centrale binnengebied, met de grootste bodemdaling, zullen dijken verhoogd moeten worden, stuwen aangelegd, de stroomrichting van rioleringen veranderd en waterafvoeren naar hogere gebieden worden gepompt, hoofdzakelijk t.b.v. de agrarische sector.

Boorgatseismometer

Deze soort accelerometer maakt het mogelijk om zwakkere aardbevingen te registreren dan met instrumenten aan de oppervlakte. Deze zwakke trillingen worden ook micro-trillingen genoemd. In de provincie Groningen zijn een aantal boorgat seismometers op ongeveer 200 m diep in het boorgat gehangen om invloeden van trillingen op bovenste grondlaag te voorkomen. Daarnaast zijn er diepe seismometers op 3 km diepte geplaatst, tot in de gashoudende zandsteenlaag. Deze boorgaten hebben 15 seismometers over een diepte tussen de 2800 m en 3200 m diep. De exacte locatie van de oorsprong van de trillingen in de zandlaag kunnen hiermee worden vastgesteld. Het werd door middel van deze boorgat seismometers bevestigd dat de trillingen alleen uit de gas-houdende zandsteenlaag komen en niet uit het daar onder liggende Carboon⁴⁸. Met meer metingen werd vastgesteld dat er ook lichte (niet voelbare) trillingen uit de grondlagen boven het zoutsteen komen.



Figuren 1-22. Door de diepe locatie worden oppervlaktetrillingen (bodemuï) vermeden.

Links. Grond-verdichter in een straat; hierdoor kunnen aanliggende woningen scheuren oplopen.

Rechts. Een hei-installatie is voor mensen nog voelbaar tot op 500 m (foto Arcantus, Appingedam nieuwbouw).

⁴⁵ Bemaling is noodzakelijk wanneer de grondwaterstand ten opzichte van het maaiveld hoger wordt omdat het maaiveld daalt door de compactie. Bemaling van te laag liggende rioleringen wordt dan ook noodzakelijk.

⁴⁶ Zie rapport: https://www.commissiebodemdaling.nl/files/nam_bodemdalingsrapport2010.pdf

⁴⁷ <https://commissiebodemdaling.nl/files/Status%20rapport%202020%20bodemdaling%20Noord-Nederland-final.pdf>

⁴⁸ Bestaande scheuren in het Carboon veranderen volgens deze metingen niet.

Bouwbesluit

Op 1 augustus 1902 trad onder het kabinet Pierson de woningwet van 1901 in werking, de basis voor de Nederlandse volkshuisvesting. Het eerste Bouwbesluit⁴⁹ trad in 1992 in werking en daarmee werden de lokale technische bouwvoorschriften voor het hele land gelijk. Op 1 januari 2003 werd een vernieuwde versie van kracht. Het nieuwste Nederlands Bouwbesluit 2012 verwijst voor de invulling van de normen naar de NEN-normbladen van het Normalisatie-instituut en de Eurocodes, die de TGB-normen NEN 6700 t/m NEN 6790 vervangen.

Sinds januari 2015 werd er voor nieuwbouw een verhoogde isolatienorm (EPC = 0,4) vereist. Dit was nog niet het geval voor verbouw. Per 1-1-2021 wordt de nieuwe BENG-norm van toepassing voor nieuwbouw, waar een EPC van $\leq 0,2$ bij hoort.⁵⁰

Bakstenen gebouwen die volgens het bouwbesluit 2015 zijn gebouwd hebben nauwelijks schade van aardbevingen tot PGAg 0,1 met uitzondering van doorzon- en rijtjeswoningen. Dit laatste type woningen houdt wél rekening met de laatste norm voor stormbelasting loodrecht op de gevels, maar in de lengterichting van een blok van 5 of 7 woningen is de stormbelasting gering, terwijl het wel de volle bevingskracht krijgt.

Figuur 1-23. De windbelasting op de kop van één woning.

Deze is ongeveer gelijk aan de windbelasting op de kop van een blok van 4, 5 of 6 woningen.

De aardbevingsbelasting op de kop van een blok van vier rijtjeswoningen is 4X zo groot als die van een enkele woning.

Bij een rijtje van zeven woningen is dat zeven keer zo groot.



Een stormbelasting op een 10 m² gevel is ongeveer 10 ton (100 g/m²). Een rijtjeswoning weegt ongeveer 100 ton. Een PGAg 0,1 betekent een aardbevingsbelasting van 0,1 x massa (100 t) = 10 t dus ongeveer gelijk aan de stormbelasting. Een blok van 4 rijtjeswoningen (schets) is volgens de bouwnorm op de korte kopzijde ook berekend op een stormbelasting van 10 ton. Loodrecht op de rij gevels is de totale stormbelasting voor 4 woningen ongeveer 40 ton. Vanwege de tussenmuren kunnen deze woningen dat makkelijk hebben. Hoewel de stormbelasting op de kop van een rijtje slechts 10 t is, is de aardbevingsbelasting in die richting 0,1 x 4 x 100 t = 40 t. Daar zijn ze niet op ontworpen en lopen daarom een groot schade- en omvalrisico, zeker als er grote raampartijen op de begane grond zitten.

Bij het verwijderen van dwarsmuren die in de lengterichting van het bouwblok staan, bijvoorbeeld voor het maken van een open keuken, zal de sterkte in die lengterichting verder verminderen.

Bouwkundig versterken

Dit zijn alle duurzame bouwkundige ingrepen aan de fundering of de draagconstructie en het dak die het gebouw sterker maken, zonder dat er sprake is van het voldoen aan het bestaande Bouwbesluit 2012 of de laatste NPR9998 voor aardbevingsbestendig versterken of verbouwen. Voor bouwkundige ingrepen die op de sterkte van de bouw betrekking hebben is een bouwvergunning nodig.

⁴⁹ Bron: Wikipedia <https://nl.wikipedia.org/wiki/Bouwbesluit>

⁵⁰ Zie: https://ondernemersplein.kvk.nl/nieuwe-gebouwen-moeten-voldoen-aan-de-beng/?gclid=EAIaIQobChMI2uGrhf337QIV0uN3Ch0vVgbeEAAySAAAEgKPPfD_BwE

Figuur 1-24. Jarino woningen uit de jaren 70. Deze hebben funderingsfouten, slechte thermische isolatie, kleine kamers en structurele bouwfouten in de gevel. Vanwege de bouwfouten waren deze woningen niet economisch te versterken. Bij het binnenzijdig isoleren zouden in de kleinste kamers bedden van 200 cm niet meer passen.



Het bouwkundig versterken was bijvoorbeeld urgent bij Jarino-woningen (foto boven) waar een groot bouwkundig gebrek aan de gevellatei opleggingen werd geconstateerd. Bij verdere inspectie bleek dat zwakke funderingsbalken de binnenmuren verticaal deed scheuren. In veel gevallen is bouwkundig versterken een maatregel om een bepaald acuut probleem (bouwfout) op te lossen of een geïdentificeerd hoog-risico situatie veilig te stellen.

Bouwkundig versterken kan ook een constructieve maatregelen zijn die zonder uitgebreid rekenwerk worden toegepast. Bij bouwkundig versterken wordt dus niet noodzakelijkerwijs voldaan aan de geldende nieuwbouwnorm. In de situatie van de Jarino-woningen was bouwkundig versterken slechts een tijdelijke noodzaak⁵¹, omdat deze woningen uit de jaren 1970 over haar geheel genomen van zeer slechte kwaliteit waren en het seismisch versterken, samen met het isoleren, heel veel meer zou kosten dan sloop en nieuwbouw.

BoWoTo. Bouw en Woning Toezicht

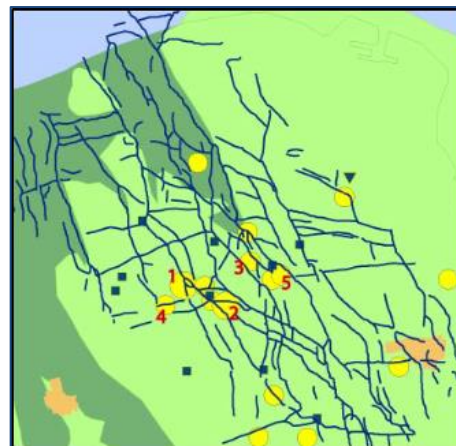
Bouw- en Woningtoezicht is een openbare instelling in iedere Nederlandse gemeente, om inlichtingen te verstrekken en controle uit te oefenen op de bestaande woningvoorraad en eventueel middelen tot verbetering aan te wijzen. Deze gemeentelijke dienst moet tevens toezicht houden op de uitvoering van de Woningwet. Het BoWoTo verleent bouwvergunningen en controleert de uitvoering en houdt archieven bij. Het BoWoTo kan bij hoog-risico situaties gebouwen onbewoonbaar verklaren en de bewoners uit laten plaatsen. In de provincie Groningen kwam het voor dat heel slecht onderhouden woningen bouwvallig waren en de aardbevingen mogelijk tot instorting kon leiden. In dat geval moest BoWoTo de woning onbewoonbaar verklaren. In de krimpregio's van de gemeenten in de provincie Groningen heeft BoWoTo in de kleine gemeenten vaak niet de capaciteit om effectief op te treden.

Breuk(vlak)

Een scheur in het gesteente waarlangs (door drukverschil of beweging in de aardkorst) twee gesteentemassa's ten opzichte van elkaar verschoven zijn. De tektonische aardbevingen ontstaan langs vele kilometers grote breukvlakken waarlangs de grondlagen langzaam verschuiven/vervormen. In veel gesteentes zitten aders die zijn ontstaan doordat de breukvlakken zijn uitgevuld met kwarts (graniet) of kalsteen (marmer). In de onder het reservoirgesteente liggende carboon (steenkool) zitten eveneens deze breukvlakken, waarvan er een groot aantal doorlopen tot in het zandsteen. Het zandsteen van het gasveld is in het centrumgebied ongeveer maximaal 200 m dik, maar onder de hele provincie (50 km doorsnee) varieert de dikte. De relatief geringe dikte (in tektonische maatvoering) heeft extra breukvlakken in dat zandsteen tot gevolg.

⁵¹ De aardbevingen van 2012 brachten deze bouwfouten aan het licht. De bewoners konden niet direct verhuisd worden, terwijl er wel steeds meer schokken te verwachten waren. De gaswinning werd in 2013 door de NAM zelfs opgevoerd. Bij verschillende woningen werden er stempels in de woonkamer gezet.

Figuur 1-25. Het 2014 KNMI-NAM kaartje toont de grootste breukvlakken. Deze zijn gemeten in het Carboon en meer in de gashoudende zandsteenlaag, in totaal ongeveer 1700. De rode nummers zijn de locaties van de grootste schokken tot 2012. In de boven het reservoir liggende Zechstein bevinden zich geen breukvlakken; daar kunnen zich dus verschuivingen langs de breukvlakken voordoen. Recente kaarten zijn door vele metingen veel nauwkeuriger en tonen veel meer breukvlakken.



Capaciteitsmethode voor ontwerp

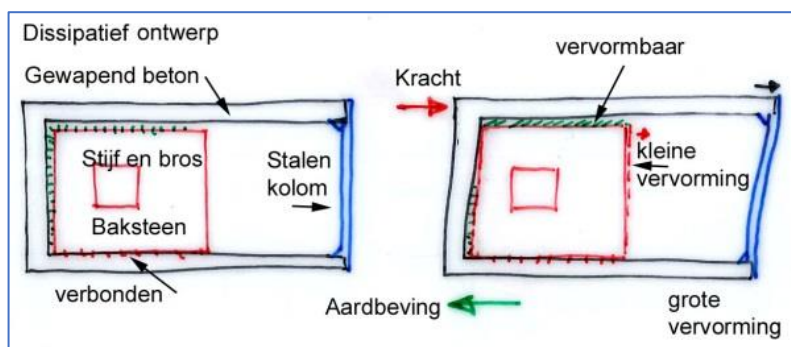
{Eurocode 8: 1.4.2.7} . Ontwerpmethode die ervoor zorgt dat de niet-vernembare elementen of de stijve onderdelen van het structurele gedeelte sterker zijn dan de flexibele of vernembare of dissipatieve elementen. Wanneer een flexibel constructief element (de houten kap van een gebouw) meegeeft onder een belasting, zal die belasting weerstaan worden door het niet flexibele gebouw element oftewel het stijve gedeelte (gemetselde topgevel). De flexibele gedeeltes zullen minder weerstand aan de belasting geven (en de krachten absorberen) dan de stijve.

Het niet-flexibele (stijve) gedeelte mag dan niet onder de belasting bezwijken, anders bezwijkt die constructie. Bij de combinatie van verschillende stijfheden moet erop gelet worden dat er geen beschadigingen optreden in de niet-flexibele elementen. Het stijve element, zoals baksteen, krijgt dus altijd het grootste deel van de belasting en zal daarom het eerste barsten.

Vooraf bij het gebruik van verschillende constructieve bouwmaterialen met verschillende stijfheden, maar ook tussen constructieve elementen en niet constructieve invulelementen, moet met dilataties hier rekening mee gehouden worden. Bijvoorbeeld grote stalen spanten van een grote schuur (flexibel, beweeglijk) die tussen de spanten zijn ingevuld met stijve baksteen (scheuren gegarandeerd).

Een stijve brosse bakstenen muur zal gauw scheuren vertonen bij een aardbeving, maar dat hoeft niet te betekenen dat de muur in draagkracht verliest. Bij reparatie van die (binnen) muur moet die afwerking wel elastisch zijn (iets beweegbare betimmering of glasvezelplaten) zodat bij een nieuwe schok niet opnieuw de scheur zichtbaar wordt. Als dat niet gebeurt is de enige optie om die muur te versterken met lintvoegwapening. In dat geval moet de verbinding van die muur met de aangrenzende muren ook versterkt worden om bij die verbindingen scheuren te voorkomen.

Figuur 1-26. Aanzicht gevel met stijven en flexibele elementen. De stijve baksteen muur heeft slechts de helft van de vernembaarheid van de gewapend betonnen kolom. De staalkolom kan weer tweemaal zoveel vervormen als de betonnen kolom. Bij de berekening van de maximaal toelaatbare horizontale aardbevingskracht moeten de belastingen in overeenstemming met de stijfheden verdeeld worden.



Bij het versterken van bakstenen gevels met metalen portalen is dit belangrijk. Een gebouw kan dan wel sterk genoeg zijn tegen instorten, maar de bakstenen muren kunnen dan bij maximale belasting alsnog scheuren wanneer geen rekening met de stijfheden is gehouden.

In een gevel met brede en smalle raampenanten zullen de breedste penanten de meeste krachten opnemen. Dit onderdeel wordt verder behandeld in Hoofdstuk 6.

Circulair bouwen

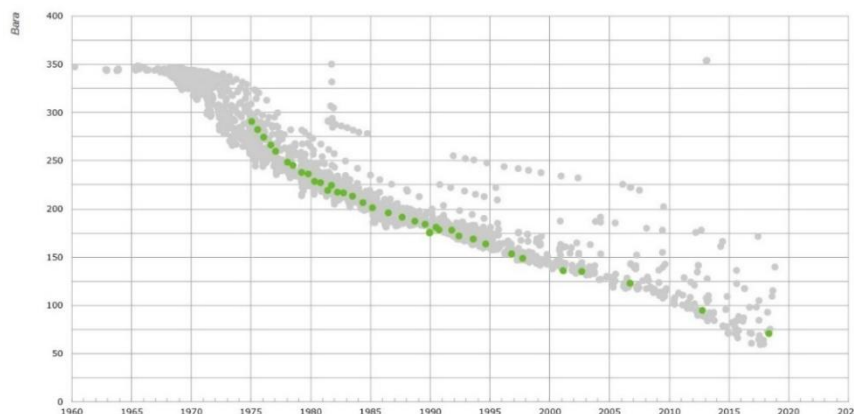
Voor een meer duurzame maatschappij zal het niet alleen nodig zijn om gebouwen beter te isoleren zodat er minder energie nodig is om ze binnen warmt te houden, maar is het ook nodig om zo min mogelijk materiaal te verspillen of te degraderen. Gebouwen moeten voor optimaal hergebruik van materialen ontworpen worden⁵². Daarin worden 5 fasen onderscheiden. **A 1-3**, de productiefase; **A 4-5**, de bouwphase; **B1-7**, de gebruiksfase; **C1-4**, de sloop- en verwerkingsfase; en **D**, de milieubaten en -belastingen buiten de grenzen van het gebouw⁵³. Hoofdstuk 12 Verduurzamen gaat hier verder op in.

De basisconstructie van een gebouw moet dan minstens goed zijn voor lange tijd (>> 200 jaar)⁵⁴. De inbouw elementen zoals scheidingswanden of een niet constructieve buitenschil voor middellange tijd (> 70 jaar). De installaties met mechanische onderdelen die bewegen en onderhoud nodig hebben > 30 jaar. Installaties zouden ook ontworpen moeten worden op het eenvoudig vervangen van componenten die snel slijten (mechanisch bewegende delen), in plaats van het hele apparaat te vervangen. De persoonlijke inrichting tenminste > 10 jaar. Dus niet elke 5 jaar een andere keuken.

Compactie

Het aardgasreservoir bestaat uit enigszins poreus zandsteen, en ligt op ongeveer 3 km diepte onder 2 km dikke grondlagen en een 1 km dikke afsluitende laag zoutsteen (samen 670 bar druk van boven). Als men een gat boort in dat zandsteen, **sput het aardgas er onder zeer hoge druk uit**. Als de gasdruk in het zandsteen reservoir afneemt (van 350 bar in 1965 naar <60 bar in 2020), worden de korrels van het reservoirgesteente door het gewicht van die bovenliggende lagen samengedrukt. Dit samendrukken wordt compactie genoemd (samen persing). Hoe verder de inwendige gasdruk daalt, hoe groter de compactie wordt. Die hangt af van de poreusheid van het gesteente en de dikte van de laag. Onder de gemeente Loppersum (incl. Ten Boer, Zeerijp en Westeremden het gebied met de meeste en sterkste bevingen) is de grootste laagdikte en grootste poreusheid gemeten. Bij samenpersen voorbij de weerstand van de elastische compactie, zal de zandsteenlaag plotseling instorten, ongeveer zoals een beschuit plotseling bezwijkt onder te grote druk van een vlakke hand.

Figuur 1-27. Gasdrukgrafiek van 1963 tot 2019. Hier wordt per meetpunt (grijze of groene dot) de locatie aangegeven.⁵⁵



⁵² Zie aanwijzing RIVM: Eenduidig bepalen van circulariteit in de bouwsector Milieuprestatie als uitgangspunt.

<https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2017-0128.pdf>

⁵³ Zie: <https://www.rvo.nl/onderwerpen/duurzaam-ondernemen/circulaire-economie/circulair-bouwen>

⁵⁴ Veel gebouwen in Nederland bestaan als sinds de 17^{de} eeuw en zijn dus >300 jaar oud en nog steeds in gebruik omdat ze goed gebouwd waren met ruime maatvoering zodat deze gebouwen ook voor ander functies gebruikt konden worden. Dit is niet het geval met jaren '60 of '70 rijtjeswoningen (materiaalvernietiging).

⁵⁵ zie: https://www.nam.nl/feiten-en-cijfers/gasdruk#iframe=L2VtYmVkl2NvbXBvbmVudC8_aWQ9Z2FzZlJ1aw

In augustus 2015 werden uit de 3 km diepe gas houdende zandsteenlaag gesteentemonsters genomen. Deze monsters hebben elk een lengte van 30 m met een totale lengte van 180 meter. Het boren naar deze kernen gebeurt met een boortoren en een holle boorkop, vergelijkbaar met de werking van een “appelboor”. Deze kernen werden geanalyseerd op hun mogelijke compactie.

Figuren 1-28. Mechaniek van compactie.

Links. Om een vergelijking te maken kan je beschuiten onder twee massa's zwaarder belasten. Een verlaging van druk in het zandsteen komt overeen met een grotere belasting van boven. Bij extra druk worden de beschuiten verkruid en iets samengedrukt.

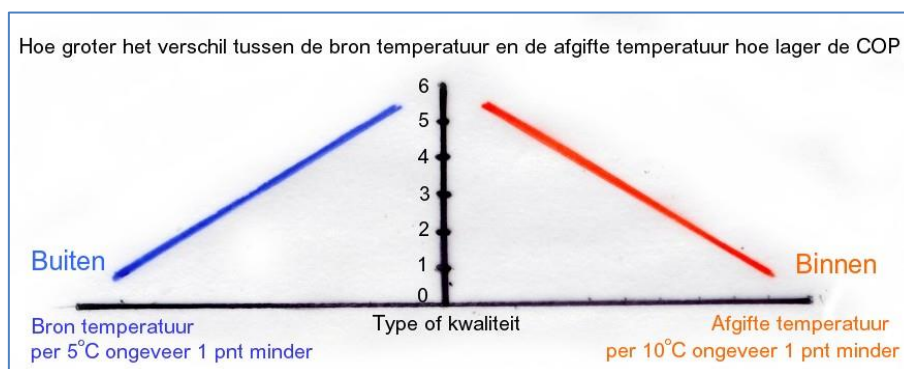
Rechts. Impressie van de korrelstructuur in de zandlaag die samendrukbaar is. Door de kernen in een laboratorium samen te persen zoals dat in de zandsteen laag gebeurt, krijgt men een indruk van de elasticiteit van de zandsteenlaag en bij welke druk deze crushed. De NAM heeft in 2015 een aantal bodemonsters uit 3 km diep gehaald om deze te kunnen testen⁵⁶.



COP Coëfficiënt van Performance

Warmtepompen zijn een methode om woningen te verduurzamen en te verwarmen zonder een aardgas CV. De installaties hebben rendementsaanduiding met COP. De COP van een warmtepomp is afhankelijk van de brontemperatuur en van de stooktemperatuur of de warmteafgifte temperatuur van het apparaat. De SCOP is het gemiddelde over het Seizoen. Als de brontemperatuur niet constant is, bijvoorbeeld bij een veranderende buitenlucht temperatuur, is de COP dat ook niet. De brontemperatuur bij diepe grondsystemen is vrij constant. Als de temperatuur voor de afgifte (water-radiatoren met 35°C of lucht-ventilatoren met 25°C) kan veranderen, dan verandert de COP ook.

Figuur 1-29. De COP en SCOP-waarden. Deze zullen veranderen bij een andere bron of afgifte temperatuur. Opgave van producenten moet aangeven op welke basis de COP is berekend.



Warmtepompen worden speciaal vermeld in verband met het verduurzamen van de woning. In Hoofdstuk 12 is er een kleine sector aan gewijd, omdat dit voor veel woningeigenaren in 2015 nog een vrij nieuw terrein was. Het is een samenvatting van wat er op het Internet te vinden is.⁵⁷

⁵⁶Zie: <https://www.nam.nl/nieuws/2015/gesteentemonsters-van-3-kilometer-diepte-uit-groningen-gasveld.html>

⁵⁷ De technologie ontwikkelt zich snel en nieuwe producten komen op de markt. Meer uitgebreide informatie over warmtepompen op de eerste pagina van www.nienhuys.info

Veel producenten van warmtepompen geven een COP-waarde op bij +7° buitenlucht temperatuur en een watertemperatuur voor de radiatoren of LTV (Laag Temperatuur Verwarming) van 35°. Die COP-waarde daalt dan sterk bij een buitenlucht temperatuur van -2°C met ongeveer 2 punten⁵⁸. In 2020, gegeven het aantal graaddagen, zal een warmtepomp met een COP van slechts 2,7 ongeveer evenveel energie verbruiken (aardgas kostenberekening versus elektriciteitskosten berekening) als een HR107-CV ketel. Om van het gas af te gaan zou een warmtepomp minimaal een

Cultureel erfgoed (heritage)

De provincie Groningen kent veel cultureel erfgoed in de vorm van oude boerderijen, herenhuizen, kerken, rentenierswoningen, karakteristieke gebouwen, windmolens en industriële gebouwen. Het behoud van die gebouwen is een belangrijk onderdeel van de menselijke identiteit, geschiedenis, belevenis en trots. De seismische versterking van deze gebouwen is ingewikkeld wanneer met aan de buitenkant van het gebouw niets zichtbaars mag veranderen. Bij sommige gebouwen zijn ook wijzigingen aan de binnenzijde niet wenselijk. Veel van deze gebouwen zijn gebouwd vóórdat er betere bouwnormen werden toegepast en hebben seismisch een zwakke constructie. Het seismisch versterken vereist dan uitwendige en inwendige constructieve versterkingen zoals portalen en vloer diafragma's, waarna het interieur dan hersteld moet worden.



Figuren 1-30. Er is veel cultureel erfgoed in de provincie Groningen.

De bepaling van wat cultureel erfgoed is en wat niet, en tot welk niveau deze gebouwen een speciale conserverende behandeling moeten krijgen hangt gedeeltelijk af van de betrokken gebouw eigenaren, ambtenaren en instituten die met historie en architectuur te maken hebben.

In het hoofdstuk 3 komen de schoorstenen ter sprake die op vrij eenvoudige wijze vervangen kunnen worden door lichtgewicht imitaties (en inwendig verwijderd), waardoor de dak- en gebouwbelasting aanzienlijk minder wordt en daardoor het gebouw relatief sterker, zonder dat er een valrisico bestaat. De funderingen van deze oude gebouwen zijn vaak 'op staal' en in het verloop van tijd aan zettingen onderhevig, die verergerd kunnen worden door de aardbevingen. Voor het conserveren van deze gebouwen is dan een verbetering van de hele fundering noodzakelijk, waarover in hoofdstuk 4 meer details worden gegeven.

In het hoofdstuk 5 wordt de *Base-isolation* methode uitgebreid toegelicht, die echter voor laagbouw een hele dure methode is, tenzij men een voor Groningen een geschikt model lokaal produceert (voorstel in hoofdstuk 5). De hoge kosten van de dubbele, sterkere fundering en geïmporteerde systemen maken het een extra dure operatie.

CVW, Centrum Veilig Wonen

⁵⁸ Bij het beoordelen van de COP moet het duidelijk zijn wat de minimumtemperatuur is, want bij een hoge minimumtemperatuur opgave wordt de COP hoger. Om warmtepompen met elkaar te vergelijken moeten de COP's of de SCOP's dus op de dezelfde temperatuurrange bepaald zijn.

Nadat de NAM tot 2014 de schade afhandeling had gedaan werd in 2015 het Centrum Veilig Wonen in Appingedam opgericht, om het hele proces van schademelding, inspectie, rapportage, beoordeling en begeleiding van de uitvoering van het herstel op afstand van de NAM te zetten⁵⁹.

Het CVW verzorgde ruim 75.000 afgehandelde schadedossiers, 12.000 uitgevoerde inspecties en opnames, 5.000 aangeleverde versterkingsadviezen, 950 versterkte huizen, 3.000 veiliger gemaakte woningen (en een veelvoud daarvan door het verwijderen van schoorstenen), 200 tijdelijke woningen en legio scholen, dorpshuizen, kerken en andere gebouwen. (Bron: website CVW). Het CVW verzorgde de tienduizenden inspecties en beoordelingen op dezelfde basis als voorheen de NAM. Een van de problemen was dat de NAM, en daarna ook de CVW, de funderingsschade niet erkende als gevolg van de aardbevingen. Per 31 december 2019 stopte het CVW.

De Nationaal Coördinator Groningen (NCG), is daarna de uitvoeringsorganisatie in de provincie van de aardbevingschade en behandeling. Een deel van ongeveer 140 ervaren medewerkers van de CVW stapte ook over naar de NCG. Later werd het IMG opgericht, waarbij het NCG de versterkingen deed en het IMG de schademeldingen en afhandeling.

Damage State (schade niveau).

De *Damage State* is de mate van schade aan een gebouw⁶⁰.

De volgende waarden worden internationaal (Amerikaanse FEMA code) gedefinieerd:

DS0. *Damage State 0*: Geen schade (*ND = No Damage*),

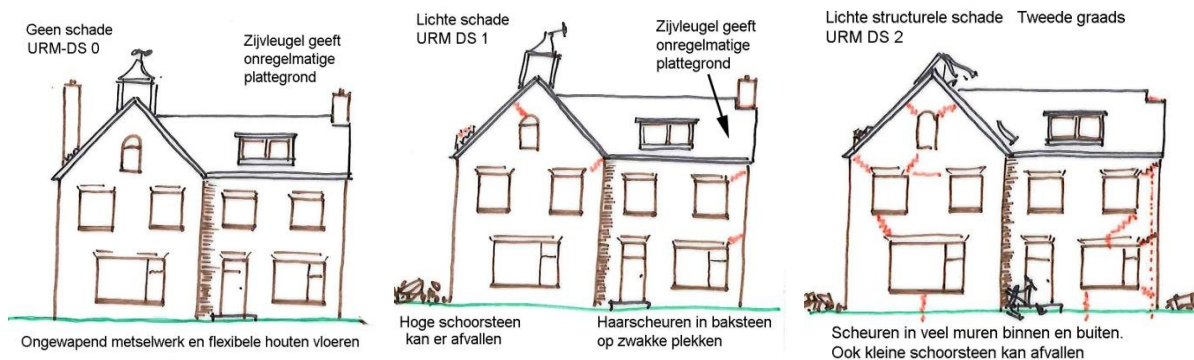
DS1. *Damage State 1*: Niet structureel. Gebouw kan bewoond blijven (*IO = Immediate Occupation*);

DS2. *Damage State 2*: Lichte schade (*DL = Damage Limitation*). Draagkracht gebouw is niet in gevaar.

DS3. *Damage State 3*: Zwارة schade (*SD = Significant Damage*). Structureel loopt het gebouw groot gevaar bij een herhaling van de aardbeving. Er aanzienlijke structurele verbeteringen nodig zijn.

DS4. *Damage State 4*: Zeer zware schade, bijna ingestort (*NC = Near Collapse*). *Ultimate Limit State*.

DS5. *Damage State 5*: Ingestort, verwoest, (*Collapsed*). Niet getekend.



Figuren 1-31. De drie: DS1, DS2 en DS3 zijn vermeld in de NPR.

Hoofdzakelijk DS1 komt in de provincie Groningen voor, omdat er geen zwaardere aardbevingen zijn. De noodzakelijke seismische versterking volgens de NPR is om D4 (gedeeltelijke instorting) te voorkomen.

⁵⁹ De methodologie van schade identificatie en goedkeuring bleef grotendeels hetzelfde en werd uitgevoerd onder indirecte regie van de NAM die de rekeningen moest betalen. Het CVW had een winst oogmerk.

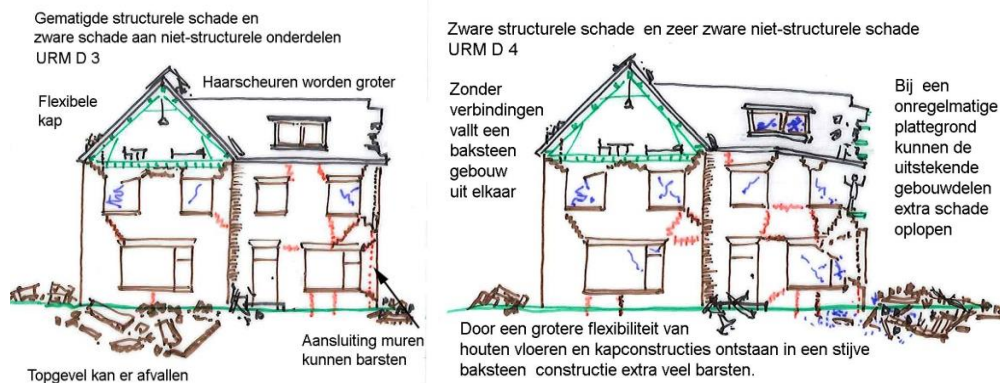
⁶⁰ Voor een uitgebreide verklaringen met beelden en foto's zie: <https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/0705.pdf> en https://ec.europa.eu/echo/files/civil_protection/civil/act_prog_rep/peadab.pdf

Figuren 1-32.

Schade

patronen DS3 en DS4.

DS2 voor wanneer het gebouw volgens oude normen werd gebouwd of wanneer bouwfouten zijn gemaakt.



DS5 wordt in de bovenstaande schetsen niet weergegeven want dat is grotendeels of geheel ingestort. De vijf *damage states* zijn opgesteld volgens de Amerikaanse HAZUS FEMA 2013 en de *European Seismological Commission* (EMS) 1998. De NPR9998:2015 behandelt slechts de eerste 3 DS omdat bij de hogere *Damage States* meestal het gebouw als economisch verloren wordt beschouwd.

De in de NPR9998 opgegeven PGAg is de maximale bevingswaarde waarna DS4 het resultaat is. Dat betekent dus niet dat het gebouw nog te repareren is of economisch te herstellen. De NPR gaat er dus van uit dat (gedeeltelijk) instorten van een gebouw voorkomen moet worden (seismisch versterken), want dan zouden er meer dodelijke slachtoffers kunnen vallen dan het (arbitrair) vastgestelde risico 10^{-5} . Dit is het 'veiligheids criterium' dat is vastgelegd voor de nieuwbouw.

De interpretatie van deze schadesituaties en de NPR die het seismische versterkingsniveau tot DS4 aangeeft bij de maximale aardbeving (in epicentrum), leidt tot een begripsverschil tussen de ingenieurs die sinds 2015 met die NPR moesten rekenen, en **de bevolking die eigenlijk helemaal geen DS1 schade wil**.⁶¹ Seismisch versterken heeft dus als doel dat het gebouw net niet instort bij de M_{max} .

De opzet van de NPR-regelgeving is dat het gebouw bij de maximale PGAg voor het aangegeven gebied **Net Niet Instort** (*Near Collapse*), dus de DS4 status kan oplopen. Dat is dan ook nog uitgezonderd schoorstenen of topgevels die er afvallen (DS2). Als je zwakke woningen (ongelijke funderingen, grote ramen, smalle penanten, houten vloeren) wilt versterken zodat er bij een PGAg 0,05 geen scheurschade of zettingsschade meer wilt hebben, zullen er toch een flink aantal maatregelen nodig zijn. Die versterkingsmaatregelen ter voorkoming van scheuren zijn bij oude bakstenen woningen vaak uitgebreider zijn dan alleen seismisch versterken.

Wanneer je een gebouw zou versterken op basis van een PGAg 0,36 (maximale aardbeving versie NPR 2015), dan zou je bij een werkelijke aardbeving type Huizinge (PGAg 0,085), waarschijnlijk geen schade krijgen, want die versterkingswaarde is dan ongeveer 4X zo hoog. Bij brosse bakstenen gebouwen zal het echter erg moeilijk blijven om lichte scheurvorming in de bakstenen gevels te voorkomen.

Het "lichte versterken" ter voorkoming van schade bij een lage PGAg 0,05 of PGAg < 0,1 is dus niet noodzakelijkerwijs minder versterken ter voorkoming van instorten bij een PGAg 0,36. Het is meer slim versterken zodat fundering en muurherstel plaats vindt op een zodanige manier dat het niet opnieuw gaat scheuren.

Een recent probleem⁶² voor de burger met woningschade ontstaat begin 2021, geïntroduceerd vanwege de duizenden VersterkingsAdviezen (VA's) die door ingenieursbureaus zijn opgesteld.

⁶¹ Het grote conflict in de provincie Groningen, de bevolking wil schadevrij wonen, de NPR 'net niet instorten'.

⁶² Vanwege de nieuwe regels die zijn opgesteld in de 'Bestuurlijke Afspraken Versterking Groningen' van 6 november 2020 met toezeggingen over kosten en vergoedingen.

Deze VA's werden met de NLTHA-methode en op basis van oude en veel te hoge NPR-PGA-waarden doorgerekend⁶³. De versterkingskosten volgens die VA's kunnen tonnen kosten voor gewone woningen en miljoenen euro's kosten voor monumenten. Wanneer de burger deze VA's accepteert op basis van een te hoge NPR-PGA, dan wordt de woning dus redelijk versterkt met een sterk verminderd risico op schade.

Wanneer de burger echter de woning opnieuw laat beoordelen tegen de laatste NPR9998:2020, zal geen versterking meer nodig zijn en kan die burger het bedrag van euro 30.000 zelf besteden. Bij lichte bevingen kunnen dan wel bestaande schades vergroot worden of cosmetisch gerepareerde muurdelen opnieuw barsten.

Decibel, geluid

Bij het verduurzamen van de woning (van het gas af) is elektrisch verwarmen met een warmtepomp een goede optie. De (buiten)lucht – water (radiator) warmtepomp is vaak een goede optie. Daarvoor is een buitenunit nodig. Bij het kiezen van een lucht-water warmtepomp is de geluidsbelasting belangrijk en aan wettelijke grenzen gebonden. De maximale geluidsemissie van de buitenunit mag per 1 januari 2021 niet hoger zijn dan 40 dB, gemeten op de erfrens of bij een open raam of deur in het eigen gebouw⁶⁴. Echter de meetmethoden houden een marge van 5 dB aan voor de lage tonen (dringen verder door), dus de feitelijke geluidsmetingen moeten onder de 35 dB liggen⁶⁵.

Warmtepompen tot een vermogen van 6 kW (gemiddelde woning) hebben de volgende gemiddelde geluidsemissies:

Afstand op 2 m: 48 db(A tot 51 dB(A).

Afstand op 5m: 41 db(A tot 44 dB(A).

Afstand op 10 m: 34 db(A tot 37 dB(A).

Afstand op 15 m: 30 db(A tot 33 dB(A).

Geluid dat ≤ 30 dB(A) is voldoende laag om bij te kunnen slapen, ≥ 35 dB(A) is al slaap verstorend.

Figuur 1-33. De buitenventilator en compressor produceren het meeste geluid.

Hoe groter de ventilator is hoe minder geluid. Voor de buitenunit "groter is beter". De compressor van de bodemwarmtepompen geven lawaai. De circulatiepomp van de PVT ook. foto (www.destillewarmtepomp.nl)



Een buitenunit van lucht-water warmtepomp kan bijvoorbeeld op een dakkapel staan, als deze geheel trillingvrij is opgesteld. Onder of vlak bij een slaapkamerraam is een slechte locatie voor de buitenunit. Muren of andere oppervlaktes van harde materialen (baksteen, hout, glas kunststof) weerkaatsen geluid, planten (klimop) weerkaatsen weinig geluid. Een te kleine warmtepomp die te hard moet werken produceert meer geluid dan een grotere. Sommige warmtepompen hebben een nachtmodus die minder geluid produceert. Een modulerende warmtepomp slaat niet aan en uit (lawaaiërig, slijtage) maar draait hard en zacht naar behoefte.⁶⁶

In recente jaren komen er meer buitenunits van warmtepompen op de markt die een extra laag geluidsniveau hebben. Meestal is het zo dat hoe groter de units zijn, hoe minder lawaai ze maken

⁶³ De VA's kunnen voor gewone woningen tot euro 20.000 kosten en hebben geen relatie meer met de laatste versies van de dreigingskaarten van de NPR; er gaat immers niets (meer) instorten.

⁶⁴ Vanwege de recent verhoogde geluidsemissie eisen moeten sommige buitenunits aangepast worden. Er zijn verschillende omkastingen op de markt die een sterke geluidsdemping hebben.

⁶⁵ Geluid wordt gemeten bij 1 kHz. Het menselijk oor is gevarieerd gevoelig voor verschillende toonhoogtes. Om die variatie mee te nemen wordt gemeten in dB (A) wat minder oor-gevoelig is voor lage en hoge tonen. Een verschil van 3 dB houdt een verdubbeling van de geluidsemissie in. De marge is dus vrij groot.

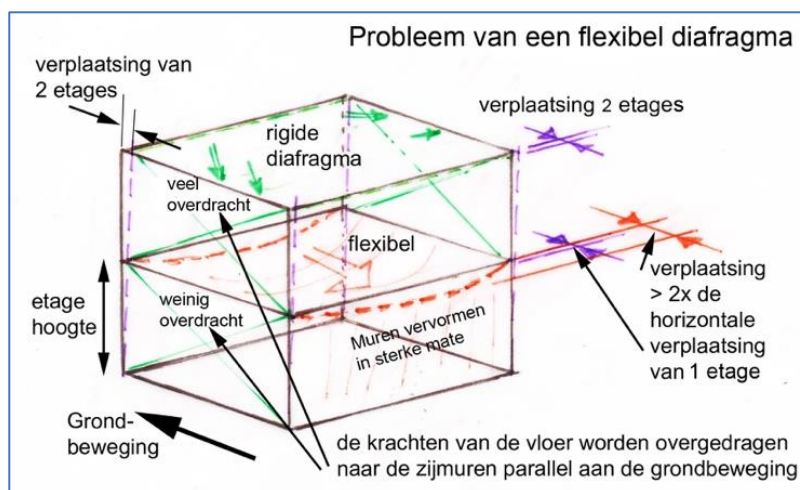
⁶⁶ Meer informatie over warmtepompen op eerste pagina van www.nienhuys.info

Diafragma (*Diaphragm*)

De term diafragma of vloerdiafragma (of horizontaal verbindende vloerplaat ⁶⁷) is het verbindende vloerelement in een gebouw dat alle dragende delen (binnenmuren en de binnenzijde van de spouwmuur of de steens buitenmuur) van een gebouw verbindt. De werking van het doorlopende vloerdiafragma zorgt ervoor dat de muren niet los kunnen komen van de vloeren. Het aanbrengen van een vloerdiafragma (verbeteren van de verbindingen van alle vloeren aan alle muren) is vooral belangrijk voor de eerste etagevloer; dit is bij lage woningen vaak de zoldervloer.

Bij een stijve gebouwplaat of horizontale schijf (diafragma) worden de muren niet loodrecht op hun vlak belast, maar worden de horizontale krachten van het gebouw en de vloer afgevoerd naar de zijmuren, die dan **in het vlak van die muren worden belast**, waar ze het sterkste zijn. Zie hoofdstuk 9.

Figuur 1-34. Een rigide diafragma zal maximaal de krachten overdragen. De aardbeving belasting gaat dan van de vloer naar de zijmuren die parallel aan de grond-beweging staan en in hun vlak sterk zijn. Een flexibel diafragma zal in zijn eigen vlak sterk vervormen en de voor- en achtermuur sterk belasten en vervormen (scheuren).



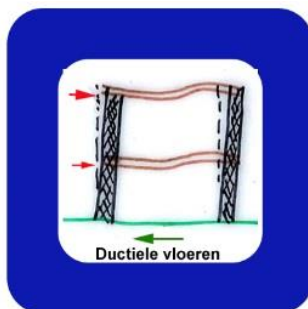
Een flexibel (*flexible*) diafragma is een (vloer) plaat of schijf die een horizontale vervorming over de lengte heeft die tweemaal zo groot is als de horizontale verplaatsing per verdieping hoogte (oranje). Een flexibel diafragma zal vervorming langs de randen toelaten, waardoor de aan het diafragma verbonden stijve muren kunnen barsten. Zie ook 'capaciteitsmode van ontwerp'.

Een rigide (*rigid*) diafragma is een erg stijve (vloer) plaat of schijf die een horizontale vervorming over de lengte heeft die de helft is van de horizontale verplaatsing per verdiepingshoogte (bijvoorbeeld een gewapend betonnen vloer). Deze vorm komt veel voor in betonnen systeembouw.

Een stijf (*stiff*) diafragma zit tussen een rigide en flexibel diafragma in (elementen met stijve en doorgeschroefde beplating zoals multiplex). Van een situatie zonder diafragma of een flexibel diafragma (plankenvloer) kan met verstijvingslaten een stijf diafragma gemaakt worden dat grote vervormingen voorkomt.

In het verticale vlak mogen de vloeren NIET stijver zijn dan de verbindingen met de dragende muren of kolommen. Indien de vloeren of diafragma's wel stijver/sterker zijn dan de kolommen zal dit bij een aardbeving een verhoogde belasting op de kolommen opleveren, vlak onder en boven de stijve vloer, waar al reeds de maximum moment zone is (maximum momentpunt). Dit kan/zal een gevaar opleveren voor de kolommen bij een te grote belasting (bij M_{max}). Bij het bezwijken van de muren of kolommen zal een gebouw instorten; bij het bezwijken van vloeren niet.

⁶⁷ Alleen de term vloerschijf is onvoldoende, want als deze los ligt werkt het niet als diafragma. De intensieve en sterke verbinding met alle draagmuren is essentieel bij het diafragma.



Figuren 1-35. De slechte situatie met stijve vloeren en dunne flexibele kolommen.

Links. Rood bord. Slecht ontwerp in aardbevingszone. Midden. De goede situatie met sterke kolommen (blauw).

Rechts. Bij het bezwijken van de kolommen stort het hele gebouw in.

De verkeersborden presentatie wordt gebruikt in het hoofdstuk 13. Basisregels voor seismisch resistent bouwen.

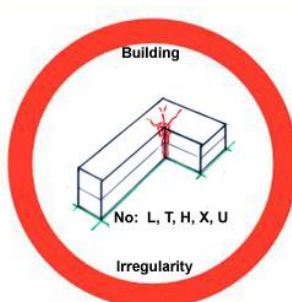
Dilatatie van gebouw

Gebouwen met een onregelmatige lange plattegrond of andere lange vleugels aan een gebouw moeten gedilateerd worden om ongewenst grote spanningen op die verbindingen bij aardbevingen te voorkomen. Gebouwen met L, T, H, X en U vormen moeten op deze aspecten gecontroleerd worden.

Figuren 1-36. Langwerpige gebouwen of gebouwen met zijvleugels.

Links. Het ronde rode bord geeft de verkeerde situatie aan.

Rechts. Heel veel gebouwen hebben scheuren met de aangebouwde delen. Dit zijn in een aardbevingsgebied bouwfouten.



Deze gebouwen met een onregelmatige plattegrond kunnen/zullen bij bevingen op de hoeken grote schade oplopen wanneer ze geen dilatatie hebben. Het dilateren van aanbouwen voorkomt schade. Gebrek aan dilataties tussen gebouwdelen veroorzaakte veel gebouwschade in de provincie Groningen.

Directe bezetting of gebruik

De Engelse term is: (*immediate occupancy, IO*).

Ofschoon kleine beschadigingen het woongenot en de woningwaarde aantasten betekent dat niet dat de bouwsterkte verminderd is. Pas bij scheuren groter dan 2 mm moet er naar de integriteit van de constructie en de verbindingen gekeken worden. Lichte gebouwschade, zowel structureel als voor de niet-structurele onderdelen, kan optreden tijdens een kleine beving. Het resultaat is dan de laagste vorm van gebouw beschadiging (*Damage State 1, DS1*).

In een dergelijk geval zijn de verticale en horizontale sterkte en stijfheid van het gebouw nog intact. Bakstenen muren hebben dan hun treksterkte ter plaatse van de scheur verloren, maar deze zijn nooit op treksterkte berekend. Ofschoon kleine reparaties noodzakelijk zijn, kan het gebouw bewoond blijven (directe bezetting of gebruik). Echter, wanneer de reparaties slechts cosmetisch zijn, zullen deze bij een soortgelijke beving weer tevoorschijn komen.

Meer dan 98% van de gebouwen in de provincie Groningen valt in deze categorie en voor de bewoners bestaat er dan geen instortingsrisico⁶⁸.

Dat neemt niet weg dat bewoners nerveus zijn geworden bij officiële informatie over mogelijk nog veel grotere aardbevingen in de toekomst⁶⁹. Bij gebouwen die al vóór de voelbare bevingen (PGA_g 0,03 = < Richter 1,5) schade hadden, zal deze schade met andere en meerdere niet-voelbare en voor mensen voelbare bevingen vaak verergeren. Funderingen 'op staal' die op het evenwichtsprincipe zijn gebouwd kunnen al sinds 1980 door de lichte niet-voelbare trillingen zettingen ondervinden. Bij de voelbare bevingen (PGA_g > 0,04 = > 2,4 Richter) zullen die zettingen en scheuren toenemen.⁷⁰

De spreiding van de gasextractie en vermindering werd sinds 2014 toegepast. Echter, hoe verder de uitputting van de gasvoorraad en waardoor de inwendige druk in de zandsteenlaag lager wordt, hoe vaker plotselinge compactie ontstaat met beving. Door langzamer het gas te onttrekken kan zowel de frequentie, de sterkte en het aantal van de bevingen laag gehouden worden. Ofschoon mensen wel veilig in hun woningen kunnen blijven wonen, ook al zitten er scheuren in de bakstenen gevels, hebben veel bewoners angstgevoelens gekregen vanwege de exorbitante prognoses over toekomstige aardbevingen tussen 2015 en 2018, die ondertussen (2021) zijn bijgesteld.



Figuren 1-37. Legio scheuren ontstaan vanuit de fundering vanwege kleine zettingen.

Bij funderingen 'op staal' en lopen deze scheuren door tot de ramen op de begane grond. Deze scheuren komen ook zonder aardbevingen veel voor. Deze scheuren kunnen wel verergerd worden door (aardbeving) trillingen.

Duur van een aardbeving

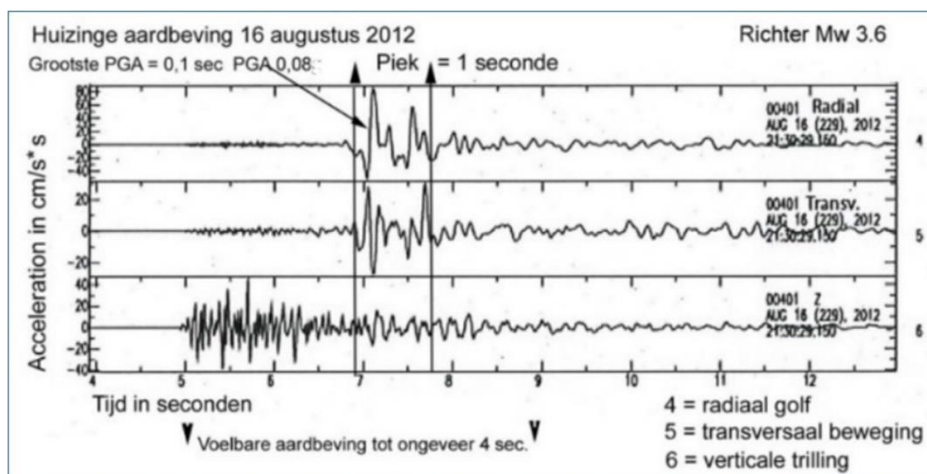
⁶⁸ Die 2% overige gebouwen hadden al reeds slechte funderingen, achterstallig onderhoud, zettingsschade of grote bouwfouten. Door deze gebouwen te stutten kan (gedeeltelijk) instortingsrisico voorkomen worden. Over het algemeen kan dus gesteld worden dat er geen algemeen veiligheidsrisico was in de provincie; dat wil zeggen 'veiligheidsrisico' volgens NPR. De Commissie Meijdam bepaalde een hoog risico standard van 10^{-5} . Ook met een wenselijk veiligheidsrisico van geïnduceerde aardbevingen van 10^{-6} was er nauwelijks risico.

⁶⁹ De beving van 16-08-2012 had een PGA_g 0,085 met een sterkte van Richter 3,6. Tegelijkertijd werd in 2014 vermeld dat de bevingen konden oplopen tot PGA_g 0,42 (**5X zo sterk**) of Richter 6 en hoger. Een probleem is dat de PGA-waarden niet evenredig zijn of gelijklopen met de Richter waarden. Omdat de KNMI bijna uitsluitende de Richter waarden vermeldde, maar de NPR alleen de PGA-waarde bleef het een onduidelijk.

⁷⁰ Bij scheurvorming in metselwerk zullen er kleine gruiskorrels in de scheur vallen, waardoor de scheur niet meer volledig dichtgedrukt kan worden. Elke volgende beving zal dit verergeren, reden waarom metselwerk scheuren altijd steeds breder worden.

De duur van een aardbeving⁷¹ wordt op veel verschillende manieren omschreven. Wat de mensen aan het aardoppervlak voelen is een subjectieve waarneming en afhankelijk of deze mensen zich al dan niet in rust bevinden, of zich laag of hoog in een gebouw bevinden, in combinatie met de elasticiteit van dat gebouw. Bij een hoog gebouw zal de constructie nog enige tijd horizontaal doorzwiepen, waardoor de mensen boven in dat gebouw de aardbeving langduriger voelen.

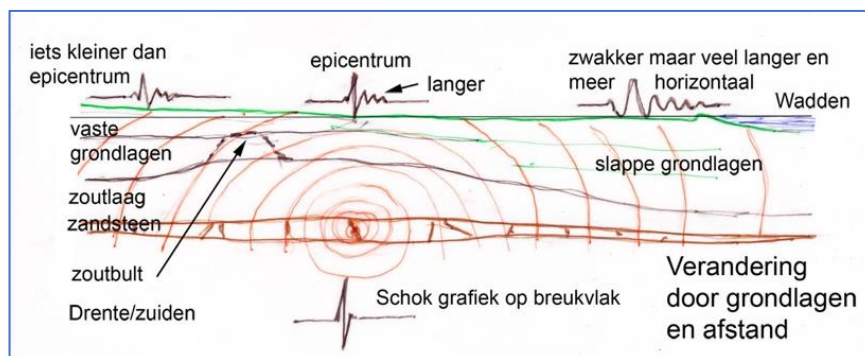
Figuur 1-38. De grafiek toont de drie beving metingen. Deze werden door een seismograaf gemaakt. Afhankelijk van de horizontale afstand tussen het epicentrum en het gebouw, in combinatie met de ondergrond, kan de duur van de aardbeving langer worden, maar wordt de intensiteit minder.



De duur van deze aardbeving van 16 augustus 2012 te Huizinge start op seconde 5 (grafiek), maar het is niet vastgelegd wanneer deze eindigt. Voor mensen die alleen de horizontale beweging voelden zal deze misschien 1-5 seconden hebben geduurd afhankelijk van hun locatie en het na-schudden van het gebouw door de elasticiteit van dat gebouw.

De ondergrond, vooral de bovenste 30 m, heeft een invloed op de sterkte en duur van de aardbeving. Ook de taaie zoutsteenlaag kan een invloed hebben. Gebouwen die op een terp staan kunnen een andere beweging ondergaan dan de gebouwen die buiten die terp staan.

Figuur 1-39. Bij een hoge zoutbult kan de schok directer zijn. Bij slappe grondlagen zal de na-trilling langer duren maar ook gedempt worden. Verder van het epicentrum verwijderd dan de diepte naar het hypocentrum (3km), zal de horizontale amplitude groter zijn dan de verticale.



Bij de Groningse geïnduceerde aardbevingen is de tijdsduur van de trillingen in het hypocentrum erg kort (0,1 - 0,3 sec.) in vergelijking met tektonische aardbevingen (tientallen seconden tot minuten). Dit komt door de geringe dikte van de zandsteenlaag (< 200m), en de kleine verticale (< 1 cm) verplaatsing in vergelijking met tektonische aardbevingen⁷². Bij tektonische aardbevingen kan dat decimeters zijn en kunnen vooral de horizontale verplaatsingen en bewegingen groot zijn. Bij tektonische bevingen is er meestal een permanente horizontale verplaatsing; bij de Groningse bevingen is er geen.

In Nepal, Kathmandu aardbeving (25-04-2015, Mw 7,9 en 15 km diep), was er tot 30 cm horizontale verplaatsing. Vanwege het grond- en gebouweffect (natrillen) voelden sommige mensen de beving in Huizinge wel gedurende 10 seconden. De grafiek *Figuur 36* geeft maar netto sec. 5 tot sec. 8 = 3 seconden aan. Daarna wordt alleen het natrillen van het gebouw gevoeld.

⁷¹ Voor een meer gedetailleerde uitleg zie: <http://www.usgs.gov/faq/node/3359>

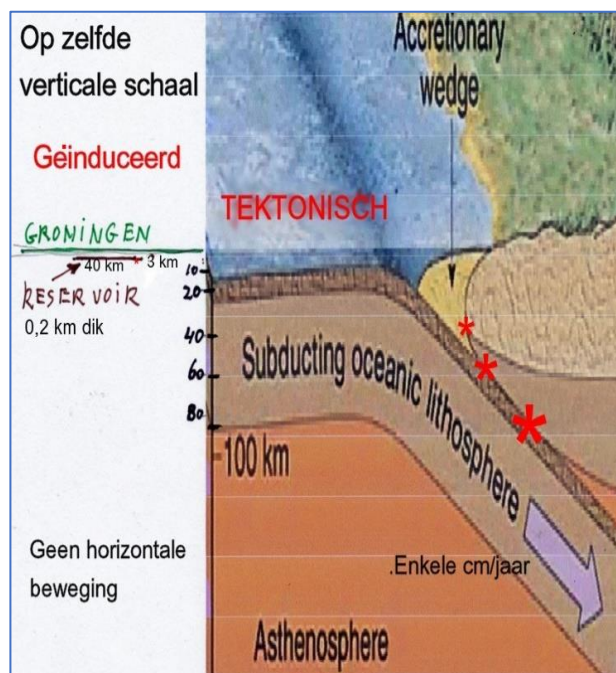
⁷² Bij de Groningse aardbevingen zijn er geen of nauwelijks horizontale verplaatsingen t.g.v. de compactie.

Figuur 1-40. Er bestaan **grote verschillen** tussen geïnduceerde en tektonische aardbevingen.

De grafiek is op **gelijke schaal ingetekend**.
 Bij tektonische bevingen verschuift de tektonische aardplaat plotseling voor decimeters schuin naar beneden en/of de andere naar boven.
 Bij geïnduceerde bevingen is er slechts een compactie van misschien een paar cm.

De Mw of Richter-waarden tussen tektonische en geïnduceerde aardbevingen zijn daarom **niet met elkaar te vergelijken**.

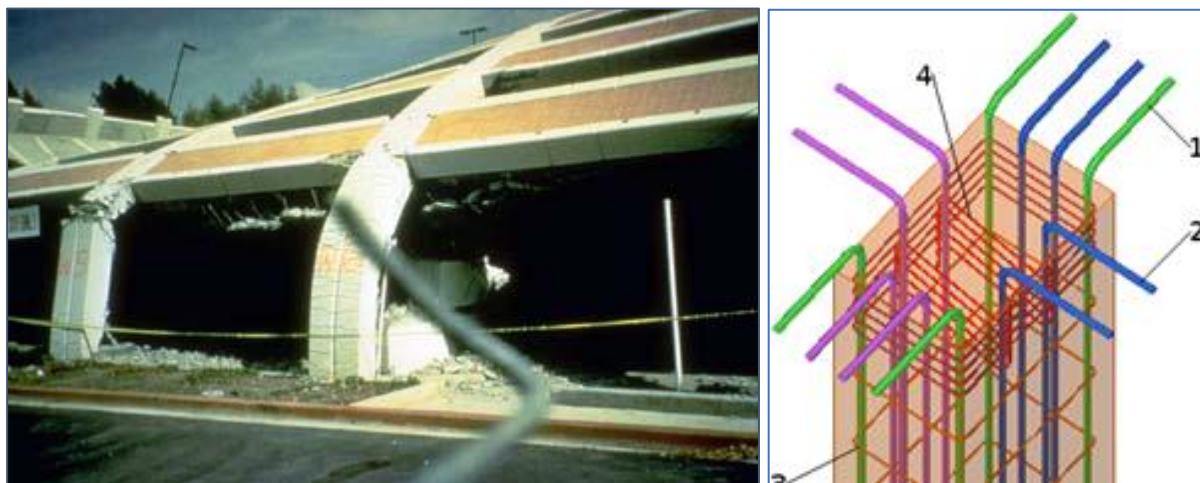
Slechts de PGA-waarden zijn bepalend voor de gebouwbelasting, vandaar dat de NPR alleen de PGA-waarden en berekening aangeeft.



Ductiel / Taai

Ductiel is de capaciteit van een materiaal of gebouw om herhaalde en niet-omkeerbare niet-elastische vervormingen te doorstaan, maar tegelijkertijd een zeer groot gedeelte van de maximale draagdracht of weerstand te behouden. Het meest bekende materiaal is metaal dat voorbij de elastische grens zelfs een hogere trekkracht kan weerstaan. Zie *Figuur 7*, trekdiagram van staal.

Door de niet-elastische vervorming zal een groot gedeelte van de aardbevingsbelasting geabsorbeerd worden. Bij gewapend betonconstructies is het belangrijk dat de combinatie tussen de treksterkte van het staal en de druksterkte van het gebroken beton zo lang mogelijk behouden blijft.



Figuren 1-41. Ductiele kolommen van een parkeergarage zijn vervormd.

De aardbevingsbelasting op deze kolommen was veel hoger dan de berekende sterkte. (Internetfoto).

Rechts. Ductiliteit wordt gerealiseerd door zowel het materiaal dat gebruikt wordt (buigbaar staal), als de manier waarop de wapening in de maximale momentzones een korf vormt, waardoor het beton binnen de korf blijft en het gebroken beton niet haar drukfunctie verliest.

Het ontwerpen van gebouwen in tektonische aardbevingsgebieden blijft onbekende risico's inhouden. Door de constructies ductiel te ontwerpen bestaat de mogelijkheid dat bij te zware (dan het ontwerp) of herhaalde schokken en bezwijken er geen totale instorting plaatsvindt.

De korfconstructie houdt het gebroken beton op haar plaats zodat het nog wel druk kan opnemen. Door het ductiele ontwerp wordt een groot gedeelte van de schok door de vervorming geabsorbeerd.

Baksteen is een bros of niet-ductiel materiaal en zal bij overbelasting barsten. Vooral bij de plotselinge korte klap van de Groningse aardbevingen is dat het geval, maar dat heeft bij scheuren < 2 mm geen constructieve consequenties. Om dit soort schade toch te voorkomen is eigenlijk alleen *Base-isolation* een optie of overmatig versterken (tegen een veel te hoge PGA. Als optie kan een licht beschadigde de baksteen muur geïsoleerd worden en opnieuw bekleed met een iets flexibel materiaal zoals hout of gelijmde steenstrips.

Figuur 1-42. Steenstrips zijn er in vele vormen en kleuren. Ook handvorm steenstrips kunnen worden uitgevoerd en op isolatieplaten gelijmd. Omdat de XPS isolatieplaten iets flexibel zijn, en de steenstrips met een iets flexibele componentlijm te voegen, kan de dragende constructie iets bewegen zonder dat dit in de buitengevel zichtbaar wordt. Op deze manier wordt het gebouw scheurvrij en geïsoleerd.



Duurzaam Bouwen (Circulair Bouwen)

Bij de noodzaak voor (licht) bouwkundig seismisch versterken van slechte kwaliteit naoorlogse woningbouw wordt soms sloop en nieuwbouw als enig economisch alternatief gezien. De combinatie van seismisch versterken én goed isoleren volgens de bouwnormen, gaan samen méér kosten dan 150% van de marktwaarde van een geïsoleerde nieuwbouwwoning. Voor een duurzame bouw heeft echter het opwaarderen van de woning de voorkeur, waarbij soms een kleine uitbreiding gewenst is om de woning aan de eisen van de tijd aan te passen. Dit kan nodig zijn wanneer de binnenruimte kleiner wordt door binnenzijdige muurisolatie. Oude woningwetwoningen hebben vaak erg kleine badkamers of smalle trappen.



Figuren 1-43. Gebouw aanpassingen bij duurzame renovatie.

Links. Bij deze rijtjeswoningen werd een prefab badkamer uitbreiding op de eerste etage aangebracht.

Rechts. Door de combinatie van een gevelversterking (metalen portaal) en een uitbreiding kan tegelijkertijd meer ruimte gecreëerd worden, betere isolatie en een andere architectuur.

De reden dat vaak aan sloop en nieuwbouw wordt gedacht heeft vier oorzaken:

- (1) De bouwtechnologie en de woonnormen waarin het gebouw destijds werd opgetrokken is achterhaald. Vooral bij slechte funderingen worden de herstelkosten hoog.

(2) De hoge arbeidskosten die tegenwoordig nog steeds gepaard gaan met het recyclen van de uit de sloop voortkomende materialen maken goede recycling duur. De industrie moet op dit terrein beter ontwikkeld worden, hetgeen kan wanneer er regionaal veel sloop aanwezig is.

(3) De CO₂-uitstoot en energiekosten van nieuwbouw zijn laag omdat de **lange termijn milieukosten niet worden doorberekend** bij de productie van nieuwe materialen.

(4) Over het algemeen zijn in 2015 de energiekosten voor het verwarmen van de woning laag, onder andere vanwege de grote gasvoorraad van Nederland. Bij minder aardgas en daarmee hogere energiekosten kan renovatie goedkoper worden.

Ter vermindering van CO₂ uitstoot, ruim bouwmaterialengebruik en niet-recyclebaar bouwafval, zal bij elke verbouw, sloop en nieuwbouwproject de constructie zo ontworpen moeten worden dat per 2050 (doelstelling van de Nederlandse overheid) bij elke wijziging van het gebouw of uiteindelijke sloop tenminste 50% van de materialen hergebruikt kunnen worden en gerecycled. **De bouwwereld verbruikt in 2020 ongeveer 40% van alle gebruikte materialen en energie.** In een circulaire economie is voor bewoning en gebruik een minimale hoeveelheid energie nodig⁷³. In 2030 zou het recycle percentage al veel hoger moeten liggen. Zie ook 'Ladder van Lansink'.

Figuur 1-44. Bij het renoveren van een jaren '30 woning is veel afval.

Het gaat gauw over een tiental containers bouwafval met bakstenen, gipsblokken, plafonds, sanitair, vloerbekleding, kasten en deuren, keukens, tegels, elektra, glas en kozijnen. Bij de afbouw nog eens 5 containers met resten hout, beplating, isolatiemateriaal en verpakkingsmaterialen.



Circulair bouwen is een economie van gesloten kringloop waarbij materiaalbehoud voorop staat⁷⁴.

- a. Gebruikte materialen behouden bij circulair nog veel van hun waarde, ook na de sloop van het gebouw. Een gebouw moet daarom zo ontworpen worden dat het bij veranderende sociale behoeften ook anders kan worden gebruikt. Optimale mogelijkheid van hergebruik van materialen na sloop via *re-use*, reparatie, re-fabricage (*recycling*).
- b. Er wordt duurzame energie gebruikt. Trias Energetica is relevant.
- c. Natuurlijke ecosystemen zó houden, dat ze hun veerkracht kunnen behouden.

Het bovenstaande betekent dat in de hele keten van opdrachtgever, via bouwvakker en gebruiker, rekening met elkaar gehouden moet worden. De ontwerper moet rekening houden met de wenselijke levensduur van de bouwonderdelen: Draagstructuur (heel lang >> 200 jaar), inbouw (lang, > 70 jaar), technische installaties (25 - 30 jaar) en interieur (> 15 jaar). Montage en demontage moet eenvoudig zijn, terwijl fabrieken de elementen zo moeten produceren dat ze makkelijk hergebruikt en gerecycled kunnen worden⁷⁵. Een Cv-ketel of warmtepomp kan makkelijk 30 jaar meegaan als het ontwerp voldoende modulair is en alleen een brander, warmtewisselaar of pomp vervangen kan worden. Meer opmerkingen over Duurzaam of Circulair bouwen in Hoofdstuk 12.

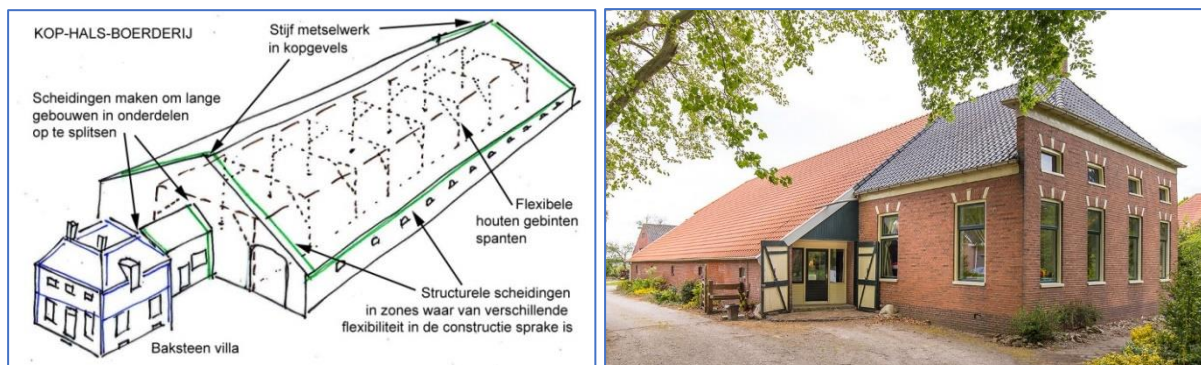
Dynamisch onafhankelijke eenheid

⁷³ Voor een brede inleiding over duurzaam bouwen zie: www.duurzaambouweninleiding.nl en boekje van Jos Lichtenberg. https://www.boomhogeronderwijs.nl/product/100-8536_Duurzaam-bouwen

⁷⁴ Zie uitgebreid: <https://www.usi.nl/uploads/media/576ba76512515/bundeling-resultaten-circular-economy-labs.pdf>

⁷⁵ Isolatiematerialen zoals steenwol kunnen heel goed gerecycled worden, maar PUR bijvoorbeeld helemaal niet.

{Eurocode 8: 1.4.2.10} Dynamische onafhankelijkheid is een dure term voor een gedilateerde constructie. Het deel van een bouwconstructie dat rechtstreeks wordt onderworpen aan de grondbeweging en waarvan het responsgedrag niet beïnvloed wordt door het (respons)gedrag van aangrenzende eenheden of bouwconstructies. Gebouwen met een sterk onregelmatige plattegrond dienen gedilateerd te worden en elk deel van dat gebouw moet dan als afzonderlijke eenheid berekend. Ongelijke gebouwdelen (hoog en laag), of gebouwdelen met ongelijke stijfheden moeten in een aardbeving onafhankelijk van elkaar kunnen bewegen. Dit is zo omdat de hoogte van een gebouw invloed heeft op de trillingsfrequentie van dat gebouwdeel.



Figuren 1-45. Verschillende gebouwdelen moeten zelfstandig kunnen bewegen.

Links: Een kop-hals-romp boerderij moet opgesplitst worden, door in drie delen te dilateren. Het woonhuis, het tussenstuk en de schuur, hebben elk een eigen dynamische onafhankelijkheid. Op deze manier wordt schade tussen de gebouwdelen voorkomen. Zo kunnen de verschillende delen met hun verschillende stijfheden als onafhankelijke eenheden berekend worden en elk op hun eigen manier versterkt.

Rechts: De aan elkaar gebouwde kop-romp boerderij moet ook achter de kop van de meer flexibele schuur worden losgekoppeld om schade aan beide gebouwen te voorkomen.

Het (oude) bakstenen woonhuis heeft een andersoortige hoogte, massa, stijfheid en gebruiksfunctie dan de grote schuur met houten gebinten. De gebintenschuur is meer flexibel en zal daardoor anders bewegen dan het kopgebouw tijdens een aardbeving. Het oude woonhuis kan dan als monument op *base-isolation* gezet worden, of het moet aanzienlijk versterkt worden bij een $PGAg > 0,1$.

Meer informatie over dit onderwerp in Hoofdstuk 2 Gebouwworm.

Eigen Gebrek

Juridische term die aangeeft dat de grondoorzaak van een schade aan een gebouw niet direct een externe oorzaak heeft zoals een aardbeving, doch hoofdzakelijk te wijten is aan de handelingen of gebrek aan handelingen door gebouweigenaar. Als bijvoorbeeld de trekverbindingen in de dakspanten zijn doorgezaagd (ruimte maken voor hoge voertuigen), krijgen de muren extra druk van de kapsporen (regelmatig tegengekomen). Bij een aardbeving kunnen dan de buitenmuren weggedrukt worden en bezwijken. De primaire oorzaak van het instorten is dan het doorzagen van de spanten en niet de aardbeving⁷⁶. De gebouweigenaar kan stellen dat de opgelopen schade niet was veroorzaakt als er geen aardbeving was geweest. Deze argumentatie kan leiden tot arbitrage.

Een gebouw dat vóór 1980 werd opgericht voldoet niet meer aan de huidige bouwnorm, maar voldeed waarschijnlijk wel aan de toen geldende norm, of aan de bouwtechnische gebruiken in die tijd. Gebouwen van voor 1902 voldeden slechts aan de plaatselijke bouwgewoonten.

De bouwregelgeving verplicht de eigenaar niet om het gebouw elke keer te versterken volgens de laatste bouwnorm. Als dan vanwege die oudere bouwnorm bij een zware storm een schade optreedt,

⁷⁶ Over dit thema zijn de meeste conflicten en contra-expertise schade rapporten ontstaan. Lichte bevingen brachten niet alleen verzakkingen maar ook oude bouwfouten aan het licht.

zal dat door een verzekeringsmaatschappij niet beschouwd worden als eigen gebrek. Wanneer een schaderapport dat wel als eigen gebrek definieert is dat aanleiding voor arbitrage.

Figuur 1-46. Verwijdering van trekstangen in een garage.

Bij deze schuur ombouw tot garage heeft de aannemer de trekstangen van de spanten verwijderd om binnen meer ruimte te maken (eigen bouwfout). De dakbelasting en de boog drukken de zijmuren naar buiten waardoor de boog splijt en doorzakt. Als de boog onder spanning staat kan een extra trilling van een aardbeving een scheur veroorzaken. Hier loopt de scheur door via het raampje.

De primaire oorzaak van de scheur is dan wel de bouwfout (eigen gebrek).



In rijtjes- of doorzonwoningen hebben de voor- en achtergevel op de begane grond hoofdzakelijk ramen en geen sterkte tegen afschuiving in het vlak van die lange gevel. Iemand die in dergelijke rijtjeswoning een korte binnendraagmuur tussen woonkamer en keuken heeft weggehaald om een **open keuken** te maken, verzwakt daarmee de horizontale lengteweerstand van het gehele bouwblok. Zonder aardbeving zal het gebouw wel blijven staan, maar een aardschok in de lengterichting van het bouwblok kan dan aanzienlijke scheuren opleveren; zelfs instortingsrisico van de hele rij woningen.

De juridische vraag is of een woning met 'eigen gebrek' door de veroorzaker van de aardbeving (de NAM) gerepareerd moet worden of dat het eigen schuld is van de woningeigenaar. In principe had Bouw en Woningtoezicht (BoWoTo) die interne verbouwing en verandering aan de draagconstructie van het gebouw niet mogen toestaan⁷⁷.



Figuur 1-47. Bouwvormen en aardbevingsschade.

Links: Indien de vloer-muur verbindingen van de etage vloeren niet momentsterk genoeg zijn om een aardbeving belasting in de lengterichting van het bouwblok op te kunnen nemen, en er zijn geen binnen dwarsmuren worden gemaakt die belastingen kunnen opnemen, kan het hele blok als een kaartenhuis instorten.

Midden: Binnen dwarsmuur van een woning na de aardbeving van 1992 te Roermond. De X scheurvorming is typisch van een in het vlak van de muur overbelasting (afschuiving). Rechts, woning na aardbeving in Italië.

Gedurende de bouwinspecties na aardbevingen wordt regelmatig 'eigen gebrek' geconstateerd. Het is ook niet eenvoudig om precies aan te geven of een verzakking of scheurvorming t.g.v. een eigen gebrek is. In sommige situaties zijn de eerste (oudere) scheuren het gevolg van zettingen die op zich een groot aantal verschillende oorzaken kunnen hebben. Die kunnen door de lichte trillingen zijn ontstaan.

⁷⁷ De praktijk is echter dat BoWoTo meestal niet tot dergelijke maatregelen overgaat, soms omdat verbouwingen niet altijd gemeld worden en soms omdat er niet de administratieve capaciteit voor bestaat. Bovendien had BoWoTo nooit rekening hoeven te houden met mogelijke aardbevingen.

Bijvoorbeeld: Een aanbouw die jaren na het hoofdgebouw is aangelegd, kan een andersoortige fundering hebben dan onder het hoofdgebouw, omdat deze moet voldoen aan nieuwe bouwvoorschriften. Beide funderingen zijn dan volgens het toen geldende bouwvoorschrift aangelegd. Door verzakking, verkeerstrillingen of een aardbeving, zal er een scheur optreden tussen het oude en nieuwe gedeelte. Alle bouwkundigen weten dat nieuwe funderingen 'op staal' iets zullen gaan zetten, en er dus spanningen in het metselwerk en scheuren zullen ontstaan. Haarscheuren langs de aansluiting zijn in dit geval normaal. De bouwtechnische oplossing om dat te voorkomen is een dilatatievoeg tussen het oudere hoofdgebouw en de aanbouw. Echter, als BoWoTo de tekeningen en de uitvoering niet heeft gecontroleerd, maar gezien of geaccepteerd, wordt het niet als eigen gebrek genomen (1C in de tabel).

In de beoordelingen van bevestigingsschade waren volgens de NAM verschillende opties mogelijk:

Gebrek	Type	Beschrijving	Verantwoordelijkheid
Ondeugdelijke (ver)bouw	1A	Slecht uitgevoerde (ver)bouw in vergelijking met andere panden in dezelfde omgeving in dezelfde tijd gebouwd.	Eigen gebrek – voor rekening van de gebouweigenaar.
	1B	Deugdelijk onderhouden pand, gebouwd volgens de bij de destijds (ver)bouw geldende voorschriften en gebruiken, maar moet thans als ondeugdelijk worden aangemerkt door de voortschrijding van de kwaliteit van de bouwvoorschriften.	Geen eigen gebrek.
	1C	Verbouw of aanbouw zonder goedkeuring van Bouw en Woning Toezicht, maar door BoWoTo niet aangeschreven om te wijzigen of te slopen en meer dan 20 jaar bestaand. (Verjaard).	Geen eigen gebrek. Ook indien de verbouw of aanbouw ondeugdelijk is.
Gebouw in slechte staat (bouwval)	2	Constructieve gebreken van een gebouw, of de toestand van een perceel, van dien aard dat door de overheid op grond van de Woningwet herstel zou worden gelast.	Eigen gebrek – voor rekening van de eigenaar van het gebouw

Objectief gezien zijn de basisoorzaken van veel schades in de eerste plaats het gevolg van oude bouwvoorschriften (1B) en vervolgens door 'eigen gebrek'. Die zwakheden zijn dan aan het licht gekomen door de aardbevingen. Bij gerede twijfel kan er een tweede aardbevingsdeskundige geraadpleegd worden en kan eventueel een aanvullend bouwkundig en funderingsonderzoek noodzakelijk zijn. Sonderingen zijn ook mogelijk.



Figuren 1-48. Woning in de stutten met zijaanzicht en vooraanzicht.

Rechts. Vooraanzicht van links. De grote beschadiging boven de dubbel deur in het midden, duidt op een constructief probleem dat te maken heeft met de hoge ramen, smalle penanten tussen de raamkozijnen, de verdeling van de binnenmuren, en met het gebrek aan doorlopend verbindend diafragma onder het dak. Dit zijn bouwkundige aspecten van vóór 1920 en hebben niets te maken met eigen gebrek, want zo werd er destijds gebouwd. Om dit gebouw te versterken zijn ingrijpende maatregelen noodzakelijk.

Het grootste probleem voor de woningeigenaren was dat er geen financieringsstructuur was opgezet voor herstel van eigen gebrek of verduurzaming (isoleren, energie genereren) van de woning. Hierdoor bleven veel gebouwen in de stutten en de steigers staan. De beelden van de stutten werden in de pers en andere media veelvuldig gebruikt als negatieve beeldvorming. In plaats van een lange

termijn financieringsregeling te treffen, richtte de NAM een werkgroep stutten op, om te zorgen dat de stutten sneller verdwenen en daarmee de negatieve publiciteit.

Elasticiteit (of veerkracht)

Elk materiaal heeft een bepaalde elasticiteit die wordt uitgedrukt door de elasticiteits-module of de Young module (binnen de elastische zone). Wanneer de maximale elasticiteit van een materiaal wordt overschreden zal blijvende vervorming optreden. Zie *Figuur 7*. In het trekdiagram van staal is de elastische grens 200 N/mm^2 en de lage elasticiteitsmodulus van 220 Pa .

Baksteen (hardgrauw) heeft een hoge elasticiteitsmodulus van ongeveer $4 - 8 \text{ GPa}$, en rode metselbaksteen van $1-7 \text{ GPa}$. Baksteen kan dan ook erg weinig elastische vervorming aan; bij een iets te grote vervorming zal het daarom barsten of breken. Bij een bakstenen gebouw dat al onder spanning staat vanwege reguliere zetting onder het gebouw, zal door een korte klap van een aardbeving een barst in het metselwerk krijgen. Dit is de reden waarom er zoveel nieuwe scheuren in het Groningse aardbevingsgebied voorkwamen; door oude zettingen in de funderingen staan veel gebouwen al onder spanning.

Een gebouw dat een grote elasticiteit heeft, zoals houtskeletbouw (HSB) of een stalen frame constructie van een agrarische schuur heeft een hoge q -waarde⁷⁸ en absorbeert daarom goed de krachten van de aardbevingen. Stijf invulmateriaal van baksteen metselwerk met hoogovencement mortel heeft dat niet. Daarom ontstaan er steevast barsten tussen het flexibele frame en de stijve invulmuren. Zie ook 'Capaciteitsmode'. Oude gebouwen die met zachtere en vervormbare kalkmortel zijn gemetseld zullen bij kleine vervormingen ($< 2 \text{ mm}$) geen scheuren tonen.



Figuren 1-49. Scheuren langs stalen kolom en baksteen invulmuur.

Links. Langs de stalen kolommen van deze kippenschuur zijn de voegen in de baksteen gescheurd door verschillende elasticiteit tussen het stalen frame en de stijve bakstenen invulmuur en windbelasting of een aardshok. Deze "schade" heeft geen enkele constructieve betekenis en is in principe een tekortkoming van de bouw.

Rechts. Grote agrarische schuur met gedeeltelijk metselwerk. Door de grote kopgevels van oude boerderij-schuren op te delen (scheiding bij de staldeuren) en de bovenkanten van die gevels in flexibel plaatmateriaal uit te voeren, worden scheuren door zettingen of beweging van de flexibele kapconstructie voorkomen. Zie ook 'Capaciteitsmode'.

Epicentrum

Een epicentrum is de plaats aan het aardoppervlak recht boven de aardbevingshaard, het hypocentrum. Aangezien het epicentrum het punt op het aardoppervlak is dat het dichtst bij de haard

⁷⁸ Voor gedetailleerde uitlag van de q -waarde zie onder **Gedragsfactor**.

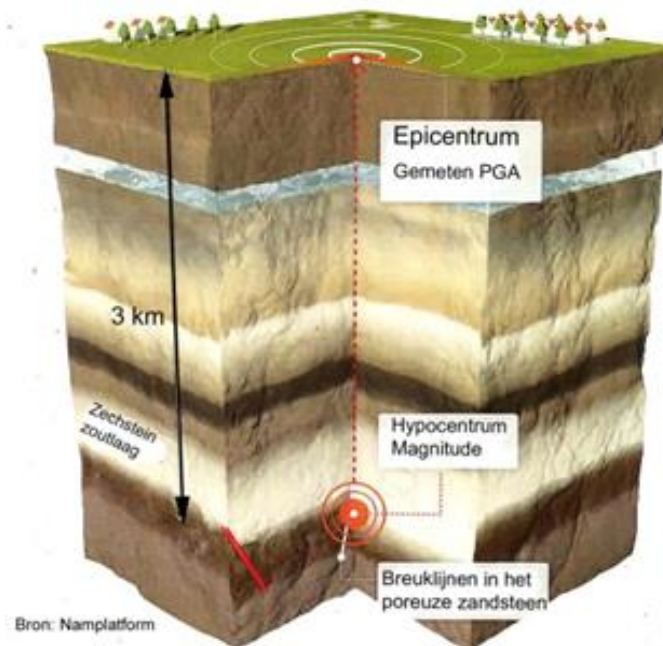
is, is dit ook het punt waar de verticale aardbevingsgolven het sterkst gevoeld worden. Op een horizontale afstand vanuit het epicentrum, die ook verder weg ligt van het hypocentrum, worden de verticale bewegingen kleiner, maar kunnen de horizontale bewegingen in lengte toenemen en vertragen. Aardbevings schade ontstaat vooral door de horizontale bewegingen. In het algemeen betekent het dat de sterkte van de bevingen voorbij 5 km van het epicentrum geleidelijk afneemt.

Figuur 1-50. Het hypocentrum en daarboven het epicentrum.

De 0,5 km tot 2 km (gemiddeld 1 km) dikke Zechsteen zoutlaag is te taai om breuken te ondergaan.

Het Carboon onder het zandsteen reservoir heeft wel breuken maar die breuken ondergaan geen beweging tijdens of na een beving.

In de provincie Groningen ligt het epicentrum ongeveer 3 km boven het hypocentrum. Een aardstok doet er ongeveer één seconde over om de afstand hypocentrum-epicentrum af te leggen.



Elke aardbeving heeft haar eigen epicentrum, waarvan de locatie met trilling-meters zeer nauwkeurig bepaald kan worden. De grootste bevingen komen voor in de regio van de gemeente Loppersum waar het reservoirgesteente het dikste is, met Ten Boer, Zeerijp en Westeremden. Verder verwijderd van het epicentrum wordt de verticale PGAg kleiner, maar bij slappe bodem kan de horizontale PGA nog ver doorwerken. Dus ook bevingsschade optreden. In de buitengebieden van het aardbevingsgebied kan het daarom voorkomen dat nieuwe schade wordt geïdentificeerd, terwijl dat niet meer het geval is in het centrumgebied omdat daar dan alles al gebarsten is.

EVS (Extended Visual Screening)

Amerikaanse afkorting voor een niet-destructief maar uitgebreid onderzoek naar de veiligheid van gebouwen in een aardbevingsgebied. Deze methodologie werd door Arup⁷⁹ geadopteerd en aangepast voor het onderzoek Groningse gebouwen. Dit wordt toegepast na een Rapid Visual Screening (RVS). Met dit uitgebreide gebouwonderzoek van de EVS, kan bepaald worden of er maatregelen genomen moeten worden om de seismische veiligheid van het gebouw te verbeteren (tegen net niet instorten). In de provincie Groningen werden deze onderzoeken uitgevoerd door gespecialiseerde bureaus en het voormalige Centrum Veilig Wonen, 2015-2020⁸⁰. Dit onderzoek kan het opvragen van bouwtekeningen inhouden en een vergelijking tussen tekeningen en de bouw.

Een fotorapportage is vaak een standaard element bij de meer complexere situaties. Bij openbare gebouwen zoals scholen (OBS) werd in Groningen standaard een EVS toegepast, en werden indien mogelijk de verbindingen van de constructies onderzocht.

Dit werd zo besloten omdat openbare gebouwen, waar veel personen in samenkomen, aan hogere veiligheids-eisen moeten voldoen dan privéwoningen. Zie ook Belangrijkheidsklasse en Gevolgklasse.

⁷⁹ Arup is het ingenieursbureau dat door de NAM in 2012 werd aangesteld om een plan te maken voor onderzoek naar de bevingsschade en voorstellen te doen voor seismische versterking.

⁸⁰ Het CVW werd in 2015 opgericht voor een schade afhandelingsproces los van de NAM. Op 4 januari 2020 wordt de Tijdelijke Wet Groningen en de oprichting van het IMG in plaats van het CVW bevestigd.

Flexibiliteit voor gebouwen

Het vermogen om vervormingen te kunnen ondergaan waarbij het materiaal of de materiaalsterkte intact blijft. Doordat een gebouw tijdens een aardbeving vervormt, wordt de aardbevingskracht gedeeltelijk geabsorbeerd door:

- (1) De materialen van de constructie zelf zijn elastisch (staal of hout);
- (2) De verbindingen tussen de constructie onderdelen zijn elastisch (staal, ductiel);
- (3) De verbindingen tussen de constructie onderdelen zijn bewegelijk (enigszins los).

Flexibele constructies hebben een verhoogde **gedragsfactor** q , waardoor de weerstand van het gebouw tegen aardbevingen groter wordt. Stapelbouw heeft vaak vanwege de zwakke of losse verbindingen tussen de stijve prefab elementen (betonplaten) wel enige flexibiliteit.⁸¹ Wanneer de verbindingen ductiel kunnen vervormen, krijgt het gebouw als geheel hierdoor enige flexibiliteit, ook al bestaat het uit betonnen panelen. Als met de precisie NLTHA-berekening deze flexibiliteit wordt meegenomen, zal blijken dat het gebouw beter bestand is tegen aardbevingen dan wanneer het slechts statisch berekend wordt. Dit geldt hoofdzakelijk voor hoge gebouwen.

Figuur 1-51. Dijkzichtflat in Delfzijl. Foto RTV Noord. Een gedetailleerd NLTHA-onderzoek werd gedaan naar de seismische sterkte van dit en andere flatgebouwen. Vanwege de aanname van iets flexibele verbindingen tussen de elementen bleek het gebouw toch een redelijke sterkte te hebben. Dit is een gevolgklasse CC3 gebouw.



Een interessant voorbeeld van een gebouw met stijve betonnen constructie elementen en iets ductiele of losse verbindingen is de Dijkzicht flat in Delfzijl (foto boven). Na precieze NLTHA-metingen van de feitelijke constructie en zeer gedetailleerde berekeningen, bleek de weerstand van het gebouw tegen aardbevingen groter te zijn dan de eenvoudige statische berekening aangaf.

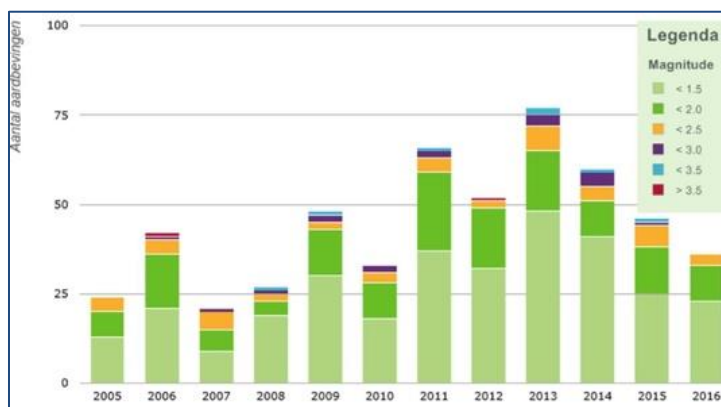
Frequentie schokken en sterkte.

De SodM laat in haar advies⁸² van april 2017 zien dat het **aantal** schokken groter dan Richter 1,5 sinds de ingrepen ná 2013 **kleiner** is geworden. Door deze maatregelen kan de ‘directe bezetting’ en gebruik van gebouwen in de provincie hoog blijven **en bestaat er geen verhoogd instortingsgevaar**, terwijl er bij de meest fragiele gebouwen aanpassingen aan de sterkte werden gepland of gemaakt.

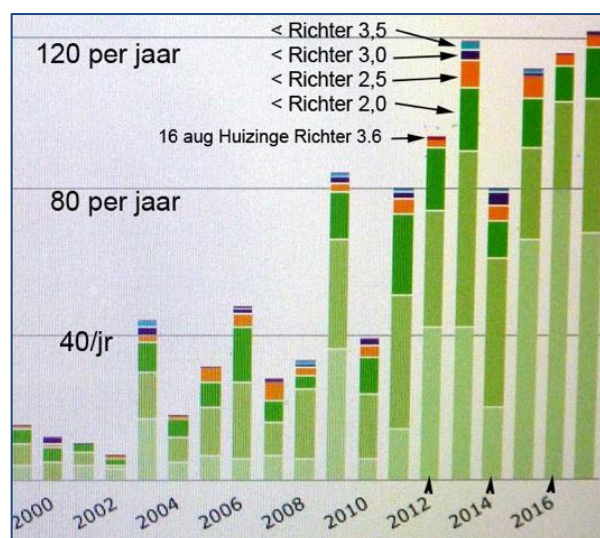
⁸¹ Betonplaten hebben betonijzeren lussen die op de verbindingen bij elkaar komen en daar met mortel worden vastgestort. Bij een matige kwaliteit mortel zullen die verbindingen iets bewegelijk zijn.

⁸² Zie bijlagen van: <https://www.sodm.nl/onderwerpen/aardbevingen-groningen/nieuws/2017/04/18/xxxxxx>

Figuur 1-52. NAM-platform grafiek⁸³ over het aantal bevingen < Richter 1,5. Deze grafiek laat zien dat er verminderingen van de aardbevingen zijn vanaf 2014, in het aantal en sterkte. Deze daling in sterkte is doorgezet. Direct na de klap op 16 augustus 2012 bij Huizinge (Richter 3,6) heeft de NAM echter de gasproductie **opgevoerd**, hetgeen te zien is aan het hoge aantal bevingen in 2013 en meer grote bevingen in 2014.



Figuur 1-53. NAM-grafiek loopt t/m 2017. De tekst is toegevoegd. In de 2012 kolom staat de Huizinge schok aangegeven⁸⁴. Na 2013 werd er een sterke verlaging van de productie ingevoerd, van 54 miljard m³/jaar tot 24 miljard m³ per jaar in 2017, waardoor in 2014 het aantal schokken sterk verminderde. In de jaren 2015 tot en met 2017 treedt er weer een vergroting van aantal aardbevingen op, vanwege de steeds lagere druk in het gasveld. Te constateren is dat sinds 2014 het aantal kleine schokken (< Richter 1,5) toeneemt, maar niet het aantal grote.



Omdat er een pauze zat van ongeveer twee jaar tot een gelijke grotere aardbeving (> Richter 3,2) was het risico van een grotere aardbeving dan de Huizinge beving 2012 (Richter 3,6) binnen twee jaar klein. Na 2013 zou de gaswinning op een lager niveau doorzetten, waardoor de kans op grotere bevingen ook kleiner zou zijn.⁸⁵ In Zeerijp was er nog een beving van PGAg 0,11. Hoewel het aantal (kleine en grote) schokken direct na de Huizinge 2012 beving eerst geleidelijk groter werd, zullen er bij verdere verlaging en nivellering geen grotere bevingen komen. Daarmee ligt de werkelijke Mmax dus op ongeveer PGAg 0,1. De technische informatie in dit document is daarom gebaseerd op de grenswaarde van seismisch versterken met een Mmax met PGAg 0,2.

Gebouwtype (*building typology*)

Een classificering van de gebouwen die een gelijksoortige bouwkundige en sterktestructuur hebben met een gelijksoortige horizontale weerstand en gedrag tijdens een aardbeving. In Groningen zijn een twaalftal hoofdcategorieën geïdentificeerd, met onderverdelingen naar de bouwperiode en naar gelang het type fundering (op staal of palen) of het soort vloerdiafragma's (flexibel of stijf).

Rijtjeswoningen en tegen elkaar aangebouwde grachtenpanden behoren tot de zwakste categorieën en bouwtypes, onder andere door gebrek aan dwarsmuren. Doorzonwoningen met relatief zware betonnen etagevloeren hebben zowel weinig muurdelen (penanten) in de voor- en achtergevels, maar door de zware vloeren extra aardbevingsbelasting. Vooral de goedkope, oudere naoorlogse bebouwing tot 1970 is daarom ook een zwakke categorie voor aardbeving strekte.




Oude gebouwen met houten vloeren zonder vloerdiafragma's behoren eveneens tot de erg zwakke constructies omdat hier de muren loodrecht op hun muurvlak belast kunnen worden.




⁸³ <https://www.nam.nl/feiten-en-cijfers/aardbevingen.html#iframe=L2VtYmVkl2NvbXBvbmVudC8/aWQ9YWYfZGJldmluZ2Vu>

⁸⁴ Voor 2020 zie: https://www.nam.nl/feiten-en-cijfers/aardbevingen.html#iframe=L2VtYmVkl2NvbXBvbmVudC8_aWQ9YWYfZGJldmluZ2Vu

⁸⁵ Hieruit blijkt duidelijk dat de NAM de gasdruk en de relatie met schokken aan het monitoren was.

De classificatie is afgeleid van de Engels-Amerikaanse versie voor UnReinforced Masonry (URM). De eerste typologie classificatie werd gedaan door Arup in 2013.

URM	Gebouw omschrijving	Periode	Woonlagen	Afbeeldingen van veel voorkomende Groningse woningen in de provincie. De oudste categorieën hebben de meeste schade.
1	Vrijstaand, hoekwoning. Flexibele houten vloerdiafragma's, halfsteens binnen- of buitenmuren of steens buitenmuren. Ongeveer 10% van het woningbestand en met de meeste aardbevingsschade	< 1920	1-2	
2	Als URM 1 . "Herenwoningen". Zolder in gebruik Enkele van de koppen van de kop-hals-romp heren boerderijen zijn met lemen stenen gemetseld. Deze zijn extra kwetsbaar en een aparte categorie.	< 1920	≥ 3	
3-4	Vrijstaand, hoekwoning. Flexibele houten vloerdiafragma's, halfsteens binnen- of buitenmuren of steens buitenmuren. De hoge schoorstenen uit de jaren '30 zijn hoog risico maar deze details vallen buiten de typologie.	1920-1960/70	1-2 en ≥ 3	

URM	Gebouw omschrijving	Periode	Woonlagen	Afbeeldingen van veel voorkomende Groningse woningen in de provincie. De oudste categorieën hebben de meeste schade.
5-6	Vrijstaand, hoekwoning. Gew. betonnen vloeren = stijf diafragma en daardoor minder schade, maar grotere massa.	>1960/70	1-2 en ≥ 3	
9-10	Rijteswoningen en doorzon Flexibele houten vloerdiafragma's, halfsteens binnen- of buitenmuren of steens buitenmuren.	1920-1960/70	1-2 en ≥ 3	
11	Vrijstaand, hoek- en rijteswoning Gewapend betonnen vloeren. Stijf diafragma. Grote raampartijen smalle penanten. Extra kwetsbaar.	>1960/70	1-2	

Bij enkele oude boerderijen werden muren gevonden die met leem gemetseld werden, deze zijn nog zwakker dan de met kalmortel gemetselde constructies, maar ook vaak monumenten.

In de bovenstaande lijst worden slechts 9 typologieën van woningen uit 2013 aangegeven, maar in 2018 zijn er totaal 60 verschillende typologieën geïdentificeerd (varianten op de 12 basistypen), waarvan sinds 2020 door het TNO zeer gedetailleerde NLTHA-berekeningen en VersterkingsAdviezen (VA's) zijn gemaakt.⁸⁶

Het typologieën rapport van het TNO is zeer uitgebreid, waarbij elke hoofdtypologie apart is uitgewerkt in deelrapporten. Deze zijn medio 2023 nog niet allemaal uitgewerkt. Bij geïnduceerde aardbevingen is zaak om de M_{max} vast te stellen op basis van de sterkte van de typologieën. Met de kennis van 2013 en eenvoudige rekenmethodes was dat mogelijk.

Van oude woningen kunnen de houten vloerbalken niet, of slechts om de andere balk, aan de buiten- of binnenmuren verbonden zijn. Het komt veel voor dat slechts enkele balken met de koppen aan de muren zijn verbonden en niet aan de parallelle zijanten. Het is ook mogelijk dat vloeren van belendende kamers niet aan elkaar zijn doorverbonden zodat het gebouwdiafragma is onderbroken.

In woningen vanaf 1953 worden vloeren van betonnen elementen toegepast. Deze vormen stijve vloeren, maar als ze onderling niet verbonden zijn of aan de zijmuren vormen het geen diafragma's. Het zijn ook **zware** constructies, dus zwaardere belastingen bij bevingen; hierdoor ontstaan ook vaker scheuren. Vooral bij rijtes-doorzonwoningen met betonnen vloeren vormen deze een risico wanneer deze gebouwen te weinig constructieve dwarsmuren hebben. Scholen of hogere woongebouwen staan niet in de bovenstaande tabel en hebben een hogere gedragsfactor q (meer slachtoffers bij instorting) en moeten daarom met een hogere belasting berekend worden.

⁸⁶ Zie rapport NCG op: <https://www.nationaalcoordinatorgroningen.nl/onderwerpen/typologieen-overzicht>
 Het door TNO opgestelde rapport: <https://www.nationaalcoordinatorgroningen.nl/onderwerpen/typologieen-overzicht/documenten/rapporten/2023/06/26/tno-rapport---typologisch-toedelen>

Woningen van na 1980 zijn hoofdzakelijk stapelbouw met een typisch eigen problematiek van gebrek aan momentsterke verbindingen tussen de vloeren en draagmuren. Veel vloeren bestaan uit afzonderlijke elementen die niet voldoende aan elkaar zijn verbonden en geen diafragma vormen. In woningen van ná 1985 worden bredere spouwen gebruikt in verband met thermische isolatie (10 cm in plaats van 5 cm) hetgeen de sterkte en stabiliteit van de muren ten goede komt. Door de bredere spouw wordt met goede spouwankers het weerstandsmoment van de muur iets groter.

In woningen van ná 1990 worden voor de binnenmuren regelmatig gelijkde kalkzandsteenblokken gebruikt waardoor de binnendraagmuren een hogere druksterkte kunnen hebben dan gemetselde kalkzandsteen in baksteen formaat. Dit komt omdat bij gemetselde voegen slechts de druksterkte van de voegen maatgevend is en de voegen zelden over de hele steenbreedte vol-zat zijn gemetseld. De lijkwaliteit is meestal veel beter dan de metselwerk kwaliteit.

Wanneer een woning seismisch versterkt moet worden, kan dat betekenen dat er uitgebreide maatregelen genomen moeten worden, vooral aan de draagmuren en etagevloeren. De draagmuren van de buitenschil moeten dan volgens de bouwverordening aangepast worden aan de thermische normen.

Figuren 1-54. Versterkingen samen met thermisch isoleren.

Bij het inwendig constructief versterken van een buitenmuur met houtskeletbouw (met trekverbindingen aan de binnen spouwmuur) is ook het thermisch isoleren volgens de laatste bouwnorm (BENG 4,7 m².K/W) vereist.



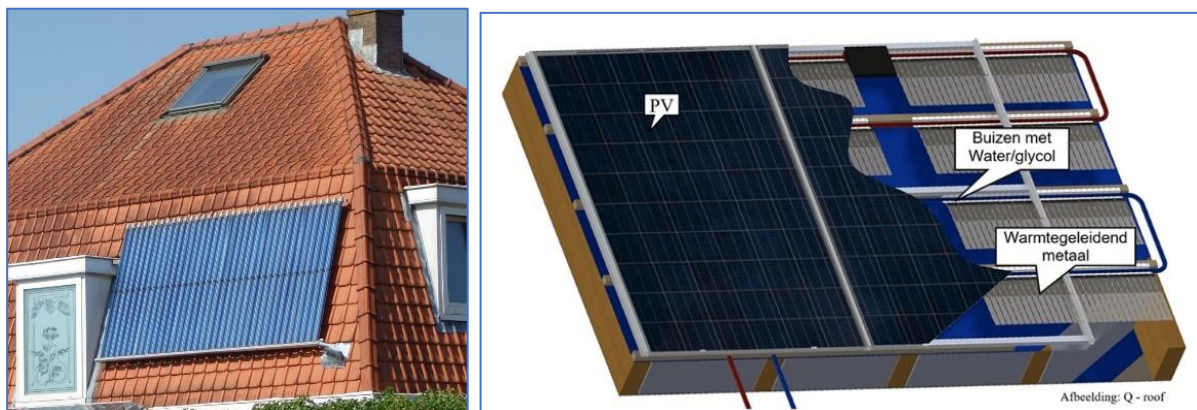
Links. Bij uitwendige versterking, bijvoorbeeld bij het plaatsen van stalen portalen in de plaats van het buitenspouwblad, kan daarna een dikke thermische isolatie en steenstrips worden toegepast, waarbij de boven etage een meer flexibele kunststof of houten gevelbekleding kan hebben (Rechts).

Bij een ingrijpende renovatie is per 30 juni 2021 de eis vastlegt voor het opwekken van een minimale hoeveelheid hernieuwbare energie – zoals zonnepanelen of warmtepompen. De verplichting vloeit voort uit de EU-richtlijn Renewable Energy Directive II (RED II). Hierin is vastgelegd dat Europese lidstaten een minimale hoeveelheid hernieuwbare energie moeten voorschrijven bij ingrijpende renovatie waarbij de verwarmings- of koelinstallatie(s) een deel is.

Ofschoon er voor het gebouwherstel na aardbevingen wel schadevergoedingen worden betaald, zijn er voor de meeste verduurzamingsmaatregelen slechts subsidies⁸⁷. Woningeigenaren moeten dus andere fondsen kunnen aanspreken om beide activiteiten (versterken en verduurzamen) tegelijk en in voldoende mate te realiseren.

⁸⁷ Zie: <https://www.rvo.nl/subsidie-en-financieringswijzer/seeh> en <https://www.rvo.nl/subsidie-en-financieringswijzer/isde> verschillende gemeenten hebben ook aanvullende subsidieregelingen..

Als aanvulling zou er een bouwfonds kunnen komen waaruit verduurzaming van de woningen gefinancierd kan worden (en/of eigen gebrek) die pas wordt afgelost wanneer de woning verkocht of overgedragen wordt.



Figuren 1-55. Behalve PV- en PVT-panelen zijn er ook zonneboilers. Zonneboilers leveren voor ongeveer 50% aan warm tapwaterbehoefte. Rechts. Thermische PV-panelen (PVT) zijn aan de warmtepomp gekoppeld.

Gedragsfactor (Behaviour factor)

Uitgedrukt in q . {Eurocode 1.4.2.6} Factor om de krachten volgens een lineaire berekening te reduceren op basis van de vervormingscapaciteit van de constructie.

Figuren 1-56. Doosvorm en gewapend metselwerk.

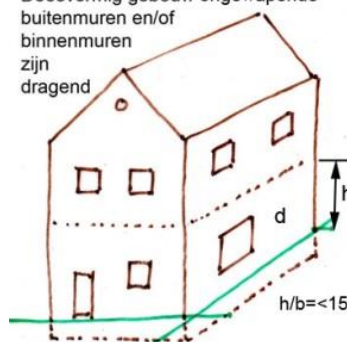
De doosvorm is de Nederlandse standaard bouwmethode bij gebruik van baksteen.

Bij een brosse en stijve constructie is de q -factor laag. Bij een flexibele constructie is de q -factor hoog.

Gewapend metselwerk is verplicht bij een $PGA_g \geq 0,2$. Deze bouwmethode komt in Nederland niet of zelden voor.

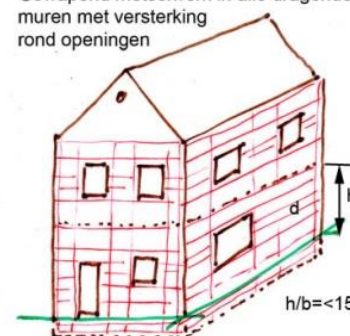
GEDRAGSFACITOR

Doosvormig gebouw ongewapende buitenmuren en/of binnenmuren zijn dragend



q factor tussen de 1,5 en 2,0
 d = dikte metselwerk > 17 cm
 zwak diafragma $q = 1,5$

Gewapend metselwerk in alle dragende muren met versterking rond openingen



q factor tussen 2,5 en 3,0
 d = dikte metselwerk > 17 cm
 zwak diafragma $q = 2,5$

In de provincie Groningen komt alleen het eerste type voor.

Figuren 1-57. Gebouwen met omsloten metselwerk en/of een frame.

Een dragende frame constructie is bijvoorbeeld een staal- of betonskelet.

Beton- en staalconstructies die kunnen vervormen (ductiel) zonder te bezwijken hebben een nog hogere q -factor. Draagconstructies zoals houtskeletbouw (HSB) hebben ook een hoge q -factor.

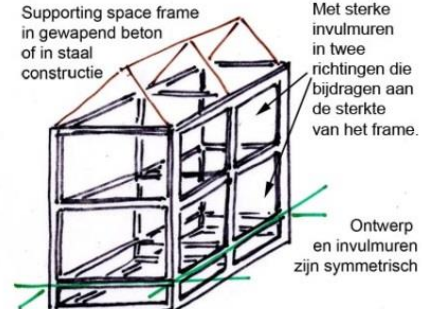
GEDRAGSFACITOR

Omsloten metselwerk van alle dragende muren



q zonder extra muurwapening 2 - 2,5
 q met extra muurwapening 2,5 - 3,0
 dikte muur = $d > 24$ cm $h / d < 15$

Supporting space frame in gewapend beton of in staal constructie



q factor voor stijve constructie 2,5 - 3,0
 q factor voor matige buigzaamheid 3,0 - 3,5

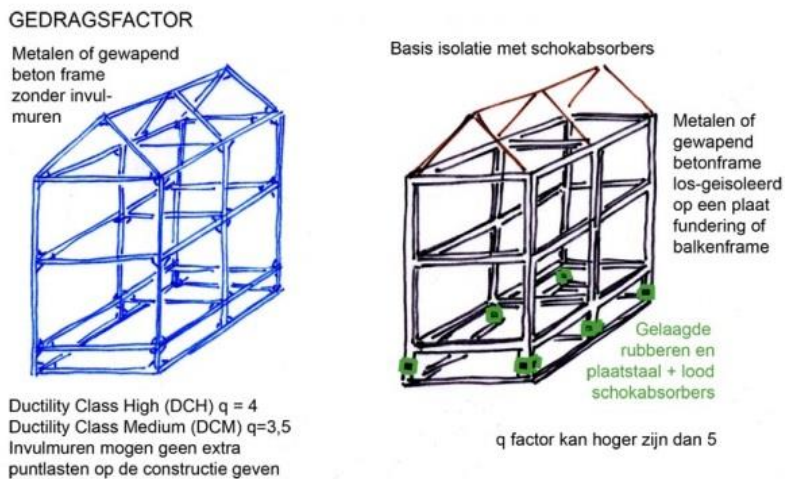
In een gebied waar natuurlijke of tektonische aardbevingen met $PGA_g \geq 0,2$ voorkomen is gewapend metselwerk verplicht (Eurocode).

Ongewapend metselwerk heeft een $q = 1,5$. Deze factor wordt in de berekening onder de deelstreep toegepast. Hoe hoger de q -factor is, hoe groter de reductie en hoe sterker het gebouw dan bestand is tegen aardbevingen. In de gewapend betonbouw worden wel extra wapening beugels in kolomeinden toegepast, maar niet in de mate die noodzakelijk is in een tektonisch aardbevingsgebied.

Figuren 1-58. Metalen skelet of gewapend betonnen gebouwen.

Wanneer deze geen constructieve of stijve invulmuren hebben, kunnen berekend worden met een nog hogere q -factor.

Een gebouw op een base-isolation heeft de hoogste q -factor, waarbij een makkelijk bewegende rolconstructie weer hoger scoort dan een stijver rubber blok of glijconstructie.



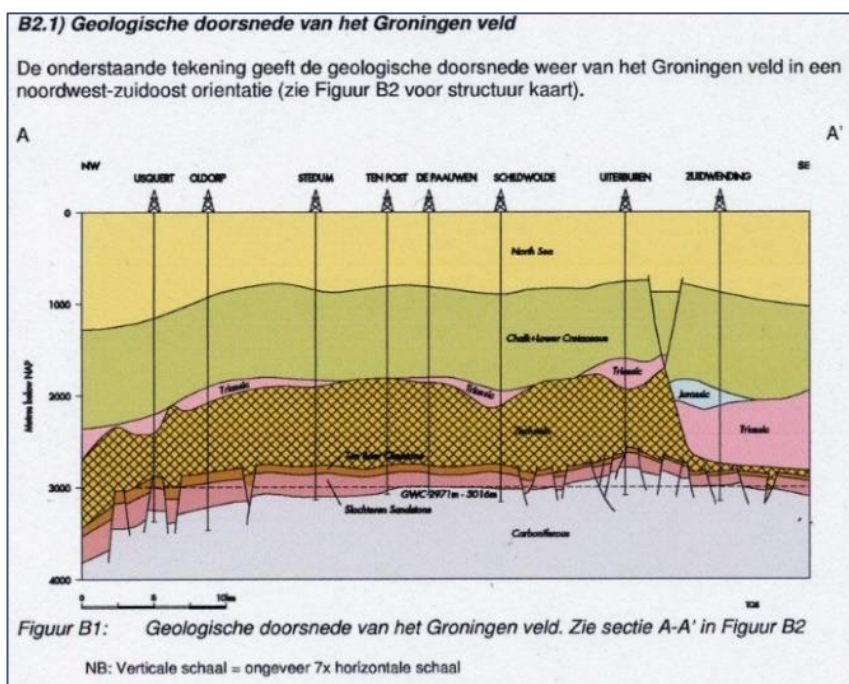
De belasting factor van het gebouw op *Base-isolation* hangt af van de stijfheid of weerstand van die *Base-isolation* elementen. Bij een hoge schuifweerstand kan dat nog $PGA_g 0,03$ zijn.

Geïnduceerde aardbeving

Deze worden sinds 1986 in de provincie Groningen geregistreerd en worden veroorzaakt door de ontlasting van spanningen in de diepe ondergrond die zijn opgebouwd tijdens de gaswinning sinds 1963. Door de drukdaling van het gas in het reservoirgesteente ter plaatse van de gasextractie, worden de verschil-spanningen met het omgevingsgesteente zó groot dat er langs bestaande breukvlakken plotselinge compacties ontstaan. Hier zakt het gesteente plotseling een paar cm in elkaar.

Figuur 1-59. Deltares rapport. Doorsnede uit Winningsplan 2013:

Verticaal is 4 km, horizontaal 50 km van Warfum N-W (links) tot Oude Pekela Z-O (rechts). Van boven naar beneden: Noordzee = kleigrond afzettingen; Kalkhoudende lagen $\approx 1-2$ km dik; Gearceerd = Zechstein steenzout afzettingen tot ≈ 1 km dik; Roze = Slochteren Rotliegend zandsteen van $\approx 100-200$ m dik ook wel het 'reservoirgesteente'; Grijs, onder is de Carboniferous laag = steenkool houdende laag en de rest van de 40 km dikke aardkorst.



Het methaangas (CH₄) kwam een paar honderd miljoen jaar geleden uit deze steenkoollaag omhoog en werd opgesloten in het poreuze zandsteen vanwege de daarop afgezette en afsluitende steenzoutlaag (Zechstein). Als gevolg van gasonttrekking treedt drukdaling in het zandsteen op en treedt compactie van het zandsteen op en daardoor bodemdaling en komvorming.

Bij ongelijkmatige en snelle onttrekking van het aardgas, genomen over het hele Groningse veld, zullen er drukverschillen ontstaan in de zandsteenlaag (het reservoir). Bij een verlaagde inwendige druk kan of zal het zandsteen plotseling geplet worden. Dit zijn dan aardshokken in het hypocentrum en veroorzaken een aardbeving aan het aardoppervlak, het epicentrum. Deze schokken zijn daarom geïnduceerd door het onttrekken van het aardgas door bedrijven.

Eén van de problemen waar de wetenschappers mee te maken hadden, is dat er wereldwijd weinig bekend is over geïnduceerde aardbevingen die slechts op 3 km diepte ontstaan, bijvoorbeeld door mijnbouw, gasonttrekking en *fracking*. Bij gebrek aan deze informatie werd door hen gebruik gemaakt van de rekenmethodes, extrapolaties en onzekerheden van veel diepere tektonische aardbevingen (10-80 km diep) die het gevolg zijn van de continentale drift van en in de aardkorst die ook tientallen kms dik is. Dat is heel wat anders dan compactie in een relatief dun laagje zandsteen

Geïnduceerde aardbevingen zijn aanzienlijk anders dan tektonische aardbevingen. De onderstaande tabel geeft de hoofdpunten weer.

#	Tektonische aardbeving	Geïnduceerde aardbeving (Groningen)
1	Door de natuur , bewegingen van grote tektonische aardplaten (continenten) naar of uit elkaar.	Door mensen veroorzaakt vanwege mijnbouw, (aardgas winning in Groningen) stuwmeren, bouw en bommen.
2	Komen uit grote dieptes van 15 km tot 80 km . Aardplaten maken dalende of stijgende beweging.	Zijn oppervlakkig zoals slechts 3 km in Groningen. Daarom zijn ze kort en fel vergeleken bij tektonische bevingen. Alleen kleine oppervlakte daling .
3	Tektonische aardplaten drijven ≈ 4 cm/jaar . Constante horizontale verplaatsing voor miljoenen jaren.	Geen horizontale verplaatsing van aardlagen.
4	Door grote diepte spreiding over een groot gebied . Voelbaar tot op honderden kms van het epicentrum.	Door kleine diepte weinig maar felle schokken en minder horizontale spreiding van schokgolven. Na een tiental km buiten het epicentrum niet meer voelbaar.
5	Horizontale bewegingen tot wel 50 cm , en mogelijke plaatselijk grote verticale verzakkingen.	Hoofdzakelijk kleine verticale verzakkingen < 1 cm .
6	Verticale beving bewegingen kunnen enkele tot vele cm's zijn , terwijl er ook grondverzakkingen en meters diepe spleten in de grond kunnen voorkomen.	Verticale bewegingen zijn in mm's . Grondverzakkingen ontstaan alleen over verloop van tijd door compactie en komvorming.
7	Grond en landverschuivingen in de bergen en blokkade van rivieren en breken van dammen.	Geen zichtbare veranderingen.
8	Duurt meerdere seconden continue tot wel enkele minuten per gebeurtenis.	Duurt slechts tienden van seconden en vaak één enkele klap.
9	Bevingen langer dan enkele seconden kan verweking van natte gronden veroorzaken	Geen lange trillingen die verweking veroorzaken.
10	Bepaalde horizontale soorten bevingen kunnen over grotere afstanden opslingereffect veroorzaken	Bevingen zijn te kort in duur om in slappe gronden opslingereffect te veroorzaken.
11	Binnen weken vele grote naschokken en herhalingen die meestal wel iets minder sterk zijn.	Slecht kleine naschokken die meestal niet voelbaar zijn. Zie figuren 2.
	De PGAg is bepalend voor de schade én het aantal direct er op volgende naschokken.	De PGAg is bepalend voor de schade, maar naschokken hebben nauwelijks invloed.
12	Naschokken groot en kort achter elkaar veroorzaken extra schade en verder instortingen aan gebouwen.	Naschokken zijn erg klein (niet voelbaar) en veroorzaken nauwelijks progressieve schade .
13	Komen periodiek met grote en regelmatige tussenpozen voor in hetzelfde gebied, variërend van jaren tot tientallen jaren. Bijvoorbeeld Kathmandu elke 75 tot 80 jaar een grote aardbeving.	Komen dagelijks en wekelijks voor, afhankelijk van de menselijke activiteit. De schokken kunnen zonder aanpassing van het winningsprogramma jaarlijks toenemen in aantallen en sterkte tot aan het einde van de gasvoorraad.
14	Erg moeilijk om grote bevingen te voorkomen, tenzij men door zware explosies diep ondergronds de opgebouwde spanningen voortijdig ontladtd.	Er goed te controleren en verminderen door aanpassing van de winningsmethode, bijvoorbeeld door nivellering en verminderde productie.

#	Tektonische aardbeving	Geïnduceerde aardbeving (Groningen)
15	Wereldwijd is hierover veel kennis opgedaan en zijn er internationale bouwwetgevingen opgesteld.	Minder internationale kennis, waardoor de onzekerheidsmarges in de berekeningen veel groter zijn .
16	Seismografen registreren deze wereldwijd.	Extra seismografen in de regio toegevoegd.
17	Mw- of Richter-waarden zijn bij bevingen uit een ander gebied of verschillende diepte NIET gerelateerd aan de PGA-waarde	Omdat alle bevingen van 3km diepte komen zijn in Groningen de Mw- of Richter-waarden met elkaar te vergelijken, maar NIET met andere gebieden .
18	Gedetailleerde bouwkundige informatie in het Engels en in de taal van het land voor iedereen beschikbaar .	Geen Nederlandstalige informatie beschikbaar tot 2015 en nauwelijks beschikbaar voor de burgers.
19	Actieve promotie van de bouwkundige kennis en wetgeving voor seismisch bestendig bouwen.	In Nederland geen aanwezigheid of promotie van publieke bouwkundige aanwezig.
20	Seismische kennis voor alle architecten en ingenieurs- opleidingen en praktijk of vak training op MBO.	Nauwelijks of geen technische opleidingen beschikbaar, alleen een paar personen HBO-ingenieurs opleiding.
21	Eenvoudige statische rekenmethode algemeen toegepast voor lage woningen en gebouwen.	Zeer gecompliceerde en dure rekenmethode toegepast voor alle bouwwerken, ook al is dat niet nodig.
22	Training materiaal voor laaggeletterden , zoals 3D bouwtekeningen en video's vrij beschikbaar.	Tekeningen en berekeningen niet beschikbaar voor de burgers . Verdienmodel van bedrijven.
23	Normaliter geen verzekering tegen schade. Wel vaak noodhulp door nationale en internationale organisaties	Veroorzaker moet schade vergoeden . Gesteggel over wat nu wel of geen bevingsschade is.
24	Verzekering mogelijk wanneer gebouwd volgens de bestaande seismische code voor de regio.	Vergoeding van schade vaak betwist en lange, dure juridische processen nodig om gelijk te krijgen.
25	Acceptatie door de bevolking dat er schade en slachtoffers zullen optreden en dat er economische verliezen ontstaan.	Geen acceptatie door de bevolking dat er meer schade of slachtoffers door de bevingen zullen ontstaan. Eis van economische compensatie.
26	Seismische code gebaseerd op net niet instorten van gebouwen met een standaard risicoprofiel van 10⁻⁵ .	Omdat geïnduceerd actief schade veroorzaakt, zou het standaard risicoprofiel 10⁻⁶ moeten zijn .
27	Bevolking is vaak toonbaar blij met de geleverde hulp.	Bevolking is achterdochtig over maatregelen en wil meer compensatie van de schadeveroorzaker of overheid.
28	Psychologische acceptatie van het noodlot. Normale rouwperiode voor overledenen.	Traumatische ontwikkelingen vanwege psychologische problemen, angsten, stress en economische schade.
29	Bij uitblijven van (internationale) hulp kunnen bewoners in een uitzichtloze armoede toestand geraken.	Bij uitblijven van goede schade compensatie of overheidsondersteuning (inclusief financiën, verlies van pensioen zekerheid dat uit de gebouwwaarde bestaat) kan langdurige stress, angstgevoelens en uitputting tot gevolg hebben met daaruit voortvloeiende gezondheidsproblemen.
30	Grote, zware, langdurige aardbevingen met massale schade komen regelmatig wereldwijd voor.	Aardbevingen blijven klein met relatief weinig schade.

Gezien het grote aantal verschillen kunnen de twee soorten aardbevingen niet goed met elkaar vergeleken worden. Beelden uit de pers van zware tektonische aardbevingen (Mw 6 of 7) zijn daarom **niet representatief** voor wat er in Groningen te verwachten zou zijn. De beving van Christchurch 22-02-2011 is enigszins vergelijkbaar.⁸⁸

De Christchurch 2011 beving duurde slechts 10 seconden en op sommige locaties kwam grondverweking voor. De totale economische schade werd begroot op >20 miljard Euro. Gebouwen die veel lijken op de gebouwen in de provincie Groningen, maar voldeden wel aan de seismische code; 20.000 gebouwen beschadigd en 10.000 niet te herstellen; 50.000 personen verhuisd. Bijna de helft van de 186 slachtoffers ontstonden door neervallend puin van topgevels in de winkelstraten.

⁸⁸ Zie voor meer data <https://www.britannica.com/event/Christchurch-earthquakes-of-2010-2011>



Figuren 1-60. Deze gebouwen zijn in de DS4 (net niet ingestort) en DS5 fase (ingestort), terwijl ze wel volgens de code seismisch bestendig waren gebouwd. Mw 6,2 en diepte slechts 5 km en een 15 km lange zone met PGAg \approx 0,22 verticaal en PGAg 0,17 horizontaal in het epicentrum. In de stad zelf waren de PGAg 0,08 verticaal en PGAg 0,07 horizontaal, vergelijkbaar met de 16-08-2012 Huizinge beving, maar dan veeeeeeeel langer van duur.

Bij een geïnduceerde aardbeving in Groningen is er meestal slechts één enkele klap, of op 16-08-2012 te Huizinge een dubbele klap met een periode van < 1 seconde. De beving in Christchurch was dus $>10X$ zo lang als die Huizinge beving met een vergelijkbare PGAg in het stadscentrum. De langere duur is dus een van de redenen waarom de schade zo groot was. Wanneer men ten minste $10X$ de Huizinge beving direct achter elkaar zou krijgen wordt het wel vergelijkbaar.

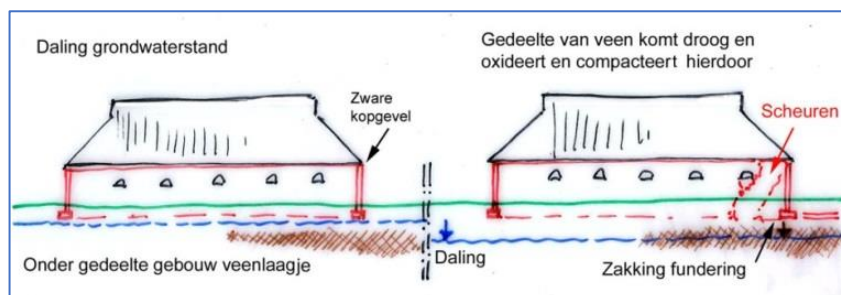
In Nieuw-Zeeland moet nieuwbouw voldoen aan de seismische code, maar de bevingen in het epicentrum (15 km buiten de stad) waren aanzienlijk hoger dan de in de Nieuw-Zeelandse code vermelde maximale PGAg-waarde, vandaar de instortingen.

Bij het bepalen van de gebouwsterkte in Groningen met de NLTHA-methode wordt meestal het gebouw uitgerekend met elke keer een grotere schoksterkte op basis van één enkele schok. Dit geeft dus de initiële gebouwsterkte weer. Wanneer op het beschadigde gebouw nieuwe schokken worden losgelaten zal dat gebouw dan initieel zwakker zijn en zal het meer beschadigen.

Grondwater

Grondwater is het water dat zich in de grond bevindt en is daardoor niet direct zichtbaar, totdat men gaat graven. De hoogte van het grondwaterniveau kan verschillen en is afhankelijk van de plaats waar men zich bevindt en de hoeveelheid neerslag. Van invloed zijn onder andere de hoogte van het gebied, de aanwezigheid van naastgelegen open water, de afstand tot sloot of drainage en de doorlatendheid van de grond (grondsoort). Bij een hoge grondwaterstand in zandgronden, kunnen minutenlange zware aardbevingen de grond verweken en haar draagkracht doen verliezen (komt niet voor in Groningen). Bij verlaagde grondwaterstand kan verdichting in veen ontstaan (t.g.v. oxidatie). Bij grondtrillingen en verschillende grondsoorten onder een lange slechte fundering kunnen op de duur zettingsverschillen ontstaan. Zettingsverschillen resulteren vaak in baksteenscheuren.

Figuur 1-61. Voorbeeld van een gedeeltelijke verzakking van een lang gebouw. Eén zijde van het gebouw op een uitgedroogde veenlaag staat, de andere op zandgrond. De massieve kopgevel van dit type schuur veroorzaakt een grote druk op de grond en deze zal dan verzakken t.o.v. de (slecht) gefundeerde lage zijgevel.



Bij het langdurig verlagen van de grondwaterstand kunnen drooggevallen veenlagen bij de oppervlakte oxideren en krimpen. Hierdoor kunnen gebouwen die op dat uitgedroogde veen staan verzakken. Omdat veen soms plaatselijk voorkomt, komen dit soort verzakkingen ook plaatselijk voor.

De bodemdaling in de provincie Groningen veroorzaakt een verhoging van de grondwaterstand t.o.v. het maaiveld. Dit kan hersteld worden door stuwten en pompen.

Figuur 1-62. Historische kopwoning van een boerderij in Garrelsweer. Hier ontstonden in 2006 en 2012 scheuren in de fundering en de kelder vanwege de aardbevingen. In combinatie met de reeds ontstane komdaling en daardoor het verhoogde grondwater liep het grondwater de kelder in. Uiteindelijk werd in 2020 dit oude gebouw op Base-isolation gezet, een klus die pas eind 2021 klaar was.



HAS, Helical Application System

Deze afkorting HAS (Helical Application System) komt veel voor in schaderapportages en verwijst naar het inlijmen met een epoxymortel van roestvrijstalen wikkels in de lintvoegen van het bakstenen metselwerk, om de muurdelen aan weerszijden van een scheur aan elkaar te verbinden en om treksterkte in het vlak van de muur te creëren. Het is een van de meest effectieve en redelijk goedkope methodes van licht bouwkundige versterken. Wordt veel in Nieuw-Zeeland toegepast voor retrofitting.

Andere benamingen zijn: Spiraalwapening, roestvrijstaal **wokkels** en lintvoegwapening.



Figuren 1-63. Toepassing van spiraal wapening of wokkels.

In een diep uitgefreesde lintvoeg wordt een roestvrijstalen spiraal of wokkelvormige muurwapening gelijmd. Daarna wordt de lintvoeg vol gelijmd en afgewerkt. Gezien de lichte bevingen in de provincie Groningen is dit de belangrijkste methode voor muurherstel. Rechts: De langs-wapening boven de lateien is hier onderbroken. Dit betekent dat bij een nieuwe aardschok daar tussen de wapeningseinden een nieuwe scheur zal komen. In de beginperiode na 2012 werd de methode veelvuldig verkeerd toegepast.

Voor bouwkundig seismisch versterken is het noodzakelijk dat deze lintvoegwapening rondom het hele gebouw doorloopt, en niet slechts een klein stukje rechts en links naast de scheur. In de beginfase van gebouwreparaties in de provincie Groningen werden heel vaak korte stukjes wokkels toegepast om de kosten laag te houden. Door alle binnen en buitenmuren doorlopend met elkaar te verbinden en de balklagen/diafragmas ook aan de muren te verbinden kunnen veel gebouwen voldoende seismisch bestendig gemaakt worden, of kan scheurvorming voorkomen worden.

Er zijn verschillende bedrijven⁸⁹ in die dit systeem uitvoeren of het door aannemers in licentie uit laten voeren, of de noodzakelijke materialen verkopen. Wanneer de fundering van een gebouw goed is en het alleen maar gaat over licht herstel van muren, zonder seismisch herstel of versterken, kunnen de kosten laag blijven. Meer in Hoofdstuk 6 Versterken muren.

Hoofdconstructie

Hoofddraagconstructie. {Eurocode 8: 1.4.2.23} De principale bouwconstructie of samenstel van constructieve onderdelen (primaire seismische elementen) waarvan bezwijken leidt tot schade die niet in verhouding staat tot de oorzaak. Dit zijn de dragende wanden, kolommen en vloeren, met hun verbindingen. Als enkele van deze delen bezwijken wordt het gehele gebouw meegesleept en ontstaat er aanzienlijk meer schade door het instortende gebouw. Een stijve en brosse hoofddraagstructuur, zoals metselwerk, zal bij overbelasting scheuren en kan dan plotseling bezwijken. Voor het bouwkundig of seismisch versterken moet de hoofdconstructie daarom versterkt worden.

Hoog-Risico Elementen

Het verwijderen van hoog-risico elementen of componenten van gebouwen⁹⁰, of het zeker stellen daarvan, voorkomt dat bij een aardbeving deze van het gebouw kunnen afvallen. Een eerste identificatie van deze hoog-risico componenten gebeurt met een RVS-onderzoek (*Engels: Rapid Visual Screening*). Wanneer bij een oppervlakkig onderzoek een potentieel probleem wordt waargenomen volgt er een verdergaande analyse met een EVS (*Extensive Visual Screening*)⁹¹.



Figuren 1-64. Hoog-risico-elementen zijn bijvoorbeeld zware schoorstenen op een flexibele houten dakconstructie, balkons die zijn ingeklemd in bakstenen muren, en borstweringen of vrijstaande topgevels die op gebouwen en boven trottoirs zitten. Tijdens het vallen kunnen ze slachtoffers maken in de publiek ruimte.

Midden en rechts. Gebouw met hoog-risico elementen: zware schoorsteen op slappe kap, ingeklemd uitkragend balkon (rood), en een gebouw zonder hoog-risico elementen (blauw).⁹²

Hoog-Risico Gebouwen

Gebouwen kunnen geïdentificeerd worden met een RVS en verder geanalyseerd met een EVS. Elk type gebouw, in combinatie met de sterkte van de aardbevingszone (max. PGAg) heeft een eigen risicoprofiel. Zware etagevloeren geven een hoog risico omdat hierdoor grote belastingen op de muren komen; lichte houten vloeren zijn minder belastend.

⁸⁹ Zie: <https://www.abcadamas.nl/> en <https://www.totalwall.nl/nieuws/de-herstel-methode-van-total-wall-concept.html>

⁹⁰ In de officiële benamingen worden een groot aantal anglicismen gebruikt vanwege de Amerikaanse bron.

⁹¹ De methoden zijn afgeleid van de FEMA. Over het algemeen worden alleen de Engelse termen gebruikt.

⁹² Een uitgebreid overzicht van slechte en goede oplossingen wordt aangegeven in het document 'Basis Regels voor Aardbevingsbestendig Bouwen' op www.nienhuys.info, tweede pagina.

Figuren 1-65. Zware betonnen vloeren (hoog risico, rood rond bord). Lichte houten en meer flexibele vloeren (laag risico, blauw bord). Houten vloeren in combinatie met smalle raampenanten kunnen echter een hoog risico vormen wanneer deze geen sterk diafragma vormen.



Als een van de meest risicovolle gebouwen kunnen de in stapelbouw uitgevoerde rijtjes- en doorzonwoningen worden aangemerkt met grote kozijnen in de gevels en zware betonnen vloeren. De begane grond etages met grote raamopeningen hebben een 'zachte etage'. Wanneer er binnenin rijtjeswoningen geen dwarsmuren zijn, die in de lengterichting van het gebouwblok de aardbeving belastingen kunnen opvangen, zijn deze erg risicovol. Het realiseren van een doorlopende open keuken in deze gebouwen is een recept voor problemen. Het versterken van deze gebouwen kan bijvoorbeeld door sterke portalen toe te voegen of sterke constructieve glaspanelen die strak in de raamkozijnen zitten en die de etagevloerbelasting in het vlak van de gevel naar de fundering overdragen.

Figuren 1-66. Zachte etage en versterking met portalen. Links: Zachte begane grond (winkels, doorzon) met veel vervorming (hoog risico). Rechts: Sterke begane grond vanwege een versterkt portaal met minder horizontale verplaatsing (laag risico).



Figuur 1-67. Het gemeentehuis in Leermens is een hoog-risico-gebouw. Het heeft extra smalle raampenanten ($b:h = <1:7$) en het gebrek aan doorgaande lateien of de aanwezigheid van een vloerdiafragma. Door in elke zijde tenminste één raam te vervangen door een constructief sterk glaspaneel worden de penanten constructief verbreed. Het is niet altijd mogelijk om van buitenaf te zien of een gebouw een hoog risico heeft. Bestudering van de bouwplannen en de bouwmethode geven dan inzicht. Voor gelijksoortige gebouwen zijn vaak gelijksoortige risico's aanwezig.



Hypocentrum

Het gebied onder het epicentrum waar de aardbeving ontstaat; ook wel 'haard' genoemd. De haarddiepte van een tektonische aardbeving kan oplopen tot tientallen kilometers. Recente grote aardbevingen in Christchurch (Nieuw-Zeeland) en Nepal hadden hun hypocentrum slechts op 5 – 15 km diep respectievelijk, waardoor de schokken in het Epicentrum extra hard aankwamen. Het hypocentrum van Groningse aardbevingen ligt heel ondiep op ongeveer op 3 km. Bij relatief kleine aardbevingen worden ze daarom wel sterk gevoeld ten opzichte van tektonische aardbevingen.

De totale energie die in het hypocentrum alle richtingen het vrijkomt wordt uitgedrukt en gemeten op de schaal van Richter. Omdat alle bevingen in Groningen uit dezelfde 3 km diepte komen, kunnen de Richter-waarden hier goed met elkaar vergeleken worden, maar voor het gevoel **niet met de Richter-waarden van tektonische aardbevingen**. De versnellende groundbeweging aan het aardoppervlak (de PGA), gecombineerd met de eigen massa van het gebouw is bepalend voor de aardbevingsbelasting op gebouwen en wordt in drie richtingen gemeten. De amplitude van elk van de drie bewegingen (verticaal P, horizontaal X en Y) is de mate van verticale of horizontale versnelling van de fundering van het gebouw. De gevoelde trilling heeft te maken met de gebouwrespons.

Instituut Mijnbouw Schade, IMG

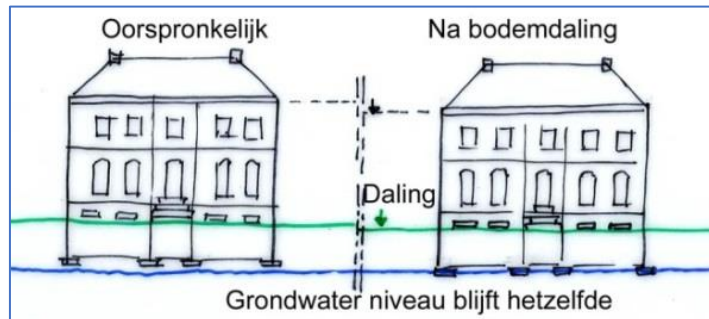
Op 31-01-2018 werd besloten tot de oprichting van de Tijdelijke Commissie Mijnbouwschade Groningen, dat als bestuursorgaan geheel onafhankelijk en zonder inmenging van de NAM, zou mogen besluiten over aanvragen en vergoedingen van mijnbouwschade. Het betrof de schade die was (en nog zou ontstaan) door bodembeweging, die het gevolg was van de gaswinning in het Groningenveld en bij de gasopslag Norg van de NAM.

Inklinking

Inklinking is de daling van de grond of het maaiveldoppervlak, veroorzaakt door een daling van de grondwaterstand, het samenpersen of wegdrukken van de grond. Inklinking van grond is een van de hoofdoorzaken van scheuren in bakstenen gebouwen op staal, die met een lichte of smalle fundering direct op de ongeroerde grond onder het maaiveld zijn gebouwd. Zie ook onder 'zetting'.

Bodemdaling door compactie veroorzaakt in eerste instantie een verhoging van de grondwaterstand. De provinciale waterhuishouding moet dan worden aangepast.

Figuur 1-68. Bij inklinking of bodemdaling zakken alle gebouwen heel langzaam in haar geheel mee, terwijl het maaiveld t.o.v. het gebouw op hetzelfde niveau blijft. Hierdoor ontstaan geen scheuren. Het grondwater komt dan omhoog ten opzichte van het maaiveld.



Komvorming

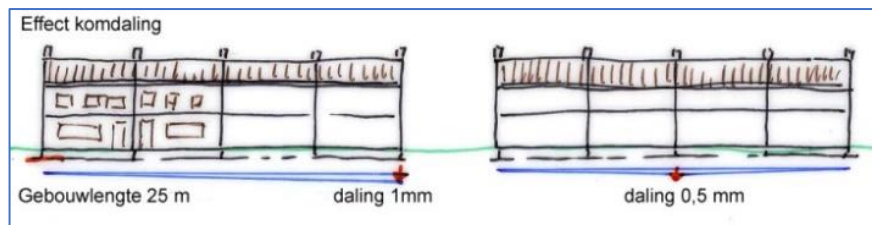
Het zeer langzaam en geleidelijk dalen van een groot centraal gebied door de compactie en bodemdaling. Hierdoor vormt het aardoppervlak ten opzichte van NAP een hele vlakke kom. De uiteindelijke diepte van de kom is gelijk aan het kaartje van de bodemdaling.

Wanneer de maximale bodemdaling over een afstand van 10 km gelijk is aan 200 mm, dan is de hoekverdraaiing of scheefstand van gebouwen over 10 m slechts 0,2 mm (allebei $1/1000^{\text{ste}}$). Dit is nauwelijks waarneembaar voor een gebouw⁹³, en heeft geen invloed op de belastingpatronen in een gebouw. Komdaling heeft wel invloed op de grondwaterstand.

Sterkere komvorming vindt ook plaats in gebieden met zoutexploitatie. Hoewel er een aantoonbare scheefstand van gebouwen kan plaatsvinden heeft het geen effect op de gebouwsterkte.

⁹³ Dit is wel meetbaar met een tilt-meter, vandaar dat er op bepaalde gebouwen of dijken dergelijke tilt-meters zijn geplaatst die over een langere tijd een verdraaiing kunnen detecteren.

Figuur 1-69. Een gebouw dat dwars op de contourlijnen van de bodemdaling staat zal aan één kant meer zakken dan aan de andere kant.

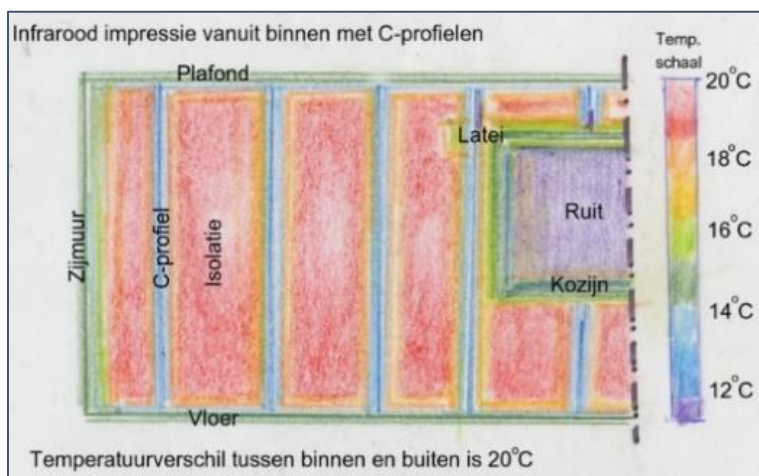


Koudebrug (verkeerd, maar ingeburgerd taalgebruik)

Bedoeld wordt: thermisch lek of warmtelek. Een thermisch lek in een constructie zal de warmte sneller geleiden dan het geïsoleerde gedeelte van de gebouwschil. Omdat dit in Nederland vooral voelbaar is in een warm vertrek terwijl het buiten koud is, is het begrip 'koude-brug' ontstaan, dat is vervolgens ingeburgerd als 'koudebrug'. Eigenlijk is het meer een warmte-brug. Immers, bij kou buiten, vloeit de warmte naar buiten, waardoor het binnen oppervlak koud aanvoelt. Op een relatief koud oppervlak in een warm en vochtig vertrek zal condensatie optreden, wat weer verkleuring, vochtplekken of schimmel kan opleveren.

Bij het aanbrengen van stalen portalen als seismische versterking van een gebouw is het belangrijk dat deze aan de binnen- of buitenkant goed geïsoleerd worden om thermische lekken te voorkomen. Ter voorkoming van condensatie in de constructie moet aan de warme kant van een constructie een dampdichte laag worden aangebracht.

Figuur 1-70. Binnenzijdige versterkingsconstructies zoals seismische versterking, kunnen worden ingevuld met isolatiemateriaal. De metalen constructies zijn echter grote warmtegeleiders en vormen lange thermische bruggen of warmtelekken. Deze warmtelekken kunnen voorkomen worden door de ondersteuning te bekleden met hoogwaardige isolatie⁹⁴.



Wanneer een stalen draagconstructie, of regels waar de thermische isolatie tussen zit, aan de warme binnenkant niet dampdicht is afgewerkt, zal op dat metaal condensatie optreden dat tot roestvorming kan leiden. De uitzettende roestvorming kan dan beschadigingen aan de binnenafwerking veroorzaken. Lange warmtelekken worden het eerste zichtbaar door neerslag van rook (sigarettenkaarsen, openhaard).

KNMI, Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut

Het nationale instituut voor weer, klimaat en seismologie. Het beschikbaar stellen van bij het KNMI aanwezige kennis, data en informatie is een kernactiviteit. Het KNMI heeft een aantal seismografen in Nederland en bestudeert de verschillende soorten aardbevingen.

Het instituut is een agentschap van het Ministerie van Infrastructuur en Milieu. De taken van het KNMI zijn vastgelegd in de Wet op het KNMI. www.knmi.nl KNMI geeft geen informatie over bouwkundige of seismische versterking.

⁹⁴ Zie het document "Warmtelekken Vermijden" op de 1^{ste} pagina van de website www.nienhuys.info

Het KNMI werd door de NAM gevraagd de M_{max} te berekenen. Het KNMI is daardoor indirect medeverantwoordelijk voor de bepaling van de aardbevingssterkte contourenkaart die bij de NPR9998 hoort. De KNMI kon alleen verleden gegevens bestuderen en de informatie die door de NAM werd aangeleverd (over de planning van de toekomstige gasexploitatie). De KNMI brekende echter de mogelijk zwaarste aardbeving die de NAM mogelijk kon creëren met versnelde en onevenwichtige aardgas exploitatie. Daaroverheen kwamen de nodige onzekerheden. De M_{max} moet echter bepaald worden op basis van de gebouwsterkte van elke typologie of de fragility curve, niet op basis van het maximaal haalbare schadeniveau.

Kwetsbaarheidsdiagram

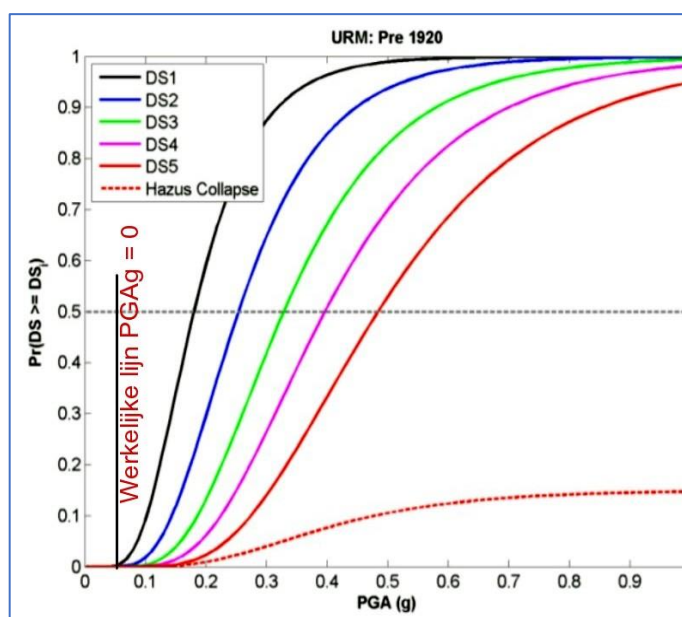
(*Fragility curve*). {Eurocode 8: 1.4.2.15}. Diagram of schema dat de kans weergeeft op een bepaalde mate van fysieke schade (scheuren, bezwijken, verzakken) als functie van de sterkte van een enkele schok van een aardbeving, type Groningen geïnduceerd⁹⁵. Elk type gebouw heeft een ander kwetsbaarheidsdiagram. Van een aantal van hetzelfde type gebouwen kan op basis van meting en observatie het schadeniveau na een aardbeving worden vastgesteld en het kwetsbaarheidsdiagram; dat dan voor alle gebouwen van datzelfde type kan gelden. De NAM-consultant Arup heeft in 2013, op basis van de toen beschikbare gegevens, die verschillende kwetsbaarheidsdiagrammen ingeschat van verschillende soorten (typologieën) gebouwen.

Volgens de onderstaande grafiek (eerste ontwerp uit 2013) zouden dan bij een PGA_g 0,4 pas 50% van de pré-1920 woningen een DS4 schade hebben. Dat wil zeggen onherstelbaar beschadigd. De onderste gestippelde lijn in de grafiek geeft de Hazus Collapse aan.⁹⁶

Op basis van de geleden schade (2.200 meldingen na Huizingen 2012) en de beoordeling van veel van die schadedossiers is in 2014 de inschatting dat pré 1920 woningen dan > 80% gedeeltelijk ingestort zouden zijn. Deze eerste ontwerp grafiek geeft daarom een onrealistisch beeld van de situatie.

Figuur 1-71. Arup 2013 kwetsbaarheidsdiagram van woningen van vóór 1920, 'op staal' gebouwd, met steeds muren en grote ramen of smalle penanten en houten vloeren zonder diafragmafunctie. De linker schaal is het aantal dat beschadiging oploopt bij de onderstaande PGA-waarde.

De zwarte lijn van DS1 (lichte schade) loopt in deze diagram pas op bij PGA_g 0,05 en is bij PGA_g 0,1 ongeveer 10%. Dit komt echter niet overeen met de werkelijkheid, waarbij in Huizinge >50% van de pré-1920 woningen al schade had bij PGA_g 0,085. De verticale PGA 0-lijn zou dus al moeten beginnen op het beging van de zwarte lijn EN alle lijnen moeten iets steiler lopen.



Voor het seismisch (preventief) versterken van die typische gebouwen met standaard bouwkundige oplossingen, is een kwetsbaarheidsdiagram een theoretische bijdrage in het besluitvormingsproces.

⁹⁵ Een enkele schok van een fractie van een seconde. Bij tientallen schokken is de schade vele malen groter.

⁹⁶ De Hazus Collapse wordt uitgelegd in het document: https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-09/fema_hazus_advanced-engineering-building-module_user-manual.pdf



Figuren 1-72. Oude herenboerderijen behoren tot de kwetsbaarste gebouwen.

Links. De oudste gebouwen vaak met leem en kalkmortel gemetseld, hebben hoge ramen, gebrek aan vloer-muur verbindingen en hoge zware schoorstenen op een slappe houten kap. Ze zijn verbonden zijn aan de grote flexibele schuur. Bovendien zijn sommige van de kopgebouwen gedeeltelijk onder-keldert wat verschil in zetting oplevert. Omdat tussen het kopgebouw en de hals of tussen de hals en de romp geen dilataties zijn gemaakt zullen ze daar scheuren. De grote schuur heeft zo haar eigen seismische problemen. (Foto's Internet-Funda)

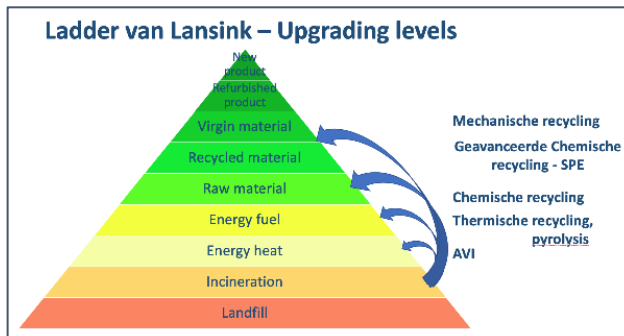
Rechts. Doorzonwoningen of rijtjeswoningen zonder dwarsmuren zijn erg kwetsbaar bij aardbevingen.

Ladder van Lansink

De politicus Ad Lansink heeft al in 1970 deze ladder ontwikkeld om het afval (in de bouw en industrie) te verminderen en beter te beheersen. Hoe hoger op de ladder, hoe beter het systeem voor het milieu (lagere CO₂-uitstoot) en beter in het kader van circulair bouwen. Hiermee liep hij al 50 jaren vooruit op de steeds groter wordende milieu- en grondstoffen problematiek.

Voor duurzaamheid en het "Cradle to Cradle" concept moet het gebruik en hergebruik van alle (bouw) materialen zoveel mogelijk geoptimaliseerd worden. Momenteel heeft bouwafval een lage restwaarde omdat er in de ontwerpfase met hergebruik geen rekening mee werd gehouden. Het werd vroeger NIET toegepast op een manier zodat het op een economisch gunstige manier recycleet kon worden.

Figuren 1-73. Verschillende Ladders van Lansink. Verbranden of storten is het minst wenselijke. Preventie van afval en het reduceren van afval is het belangrijkste, daarna komt hergebruik, ook van sloopmaterialen. De totale CO₂ uitstoot is medebepalend voor de positie op de ladder.



Bijvoorbeeld, de arbeidskosten van het schoonmaken/verzagen van oude baksteen is meestal veel hoger dan die van nieuwe baksteen (inclusief de energiekosten)⁹⁷. Dat komt omdat in de huidige (bouw)industrie de totale milieukosten voor het maken en transporteren nauwelijks meegenomen worden. Wanneer bakstenen worden verkruid dan wordt de restwaarde erg laag. Zie ook hoofdstuk 12 Verduurzamen.

Bij het handhaven van een bestaand gebouw (bij een renovatie) kunnen de woningwetwoningen uit de jaren '60 en '70 buiten de boot vallen, omdat de netto etagehoogte met 240 cm nu onvoldoende wordt geacht. Bij oude gebouwen en hoge kamers is er dan meer mogelijk. Bestaande gebouwen en monumenten handhaven staat dan ook boven aan op de ladder, ook al zijn de financiële kosten vaak hoger dan nieuwbouw. Bij 50% meerkosten t.o.v. slopen en nieuwbouw is de voorkeur hergebruik van alle uit de sloop vrijkomende bouwmaterialen. Daarvoor moet de afval gescheiden blijven.

Lateral Force Resisting System (statische weerstand berekening)

De horizontale weerstand van een gebouwverzameling wordt bepaald door de afschuifbestendige muren (*shear walls*), dragende muren portalen en kolommen, en verbonden met diafragma's, die tezamen de weerstand bieden tegen aardbevingen. Dit systeem kan op een redelijk eenvoudige manier worden uitgerekend⁹⁸ en geeft voldoende zekerheid voor de gebouwsterkte omdat er in die berekeningen de gebruikelijke marges zitten. Dit is vooral zo bij laagbouw en stijve constructies. Voor elastische of flexibele hoogbouw (+10 etages), wordt de elastische absorptie of ductiele vervorming bij deze statische berekening niet meegenomen.

De berekeningsmethode volgens bovenstaand systeem (*Lateral force calculation method*) is de klassieke berekeningsmethode voor de sterkte van een gebouw. Hierbij wordt aangenomen dat de aardbeving een horizontale kracht op het gebouw uitoefent die gerelateerd is aan de massa van het gebouw (PGA_{0,1} = 10% van de massa en PGA_{0,2} = 20% van de massa). Deze horizontale krachten op het gebouw worden overeenkomstig de geldende aardbevingscode aangepast naar gelang; (a) de massa van de constructie, (b) de belangrijkheidsfactor, (c) het constructie type of de gedragsfactor van het gebouw, (d) de grondsoort, (e) de hoogte en (f) de onregelmatigheid van het gebouw.

Voor eenvoudige gebouwen met weinig etages is de statische berekening voldoende nauwkeurig en is in een paar minuten klaar. De zogenaamd 100% precieze NLTHA-methode kost weken werk, kan alleen met een geavanceerd computerprogramma berekend worden en kan voor een klein gebouw 15.000 euro kosten. Deze methode geeft geen betere uitkomst wanneer het over de lage PGA_{0,2} gaat zoals relevant is in de provincie Groningen of geïnduceerde aardbevingen.

Oudere gebouwen hebben vaak aanpassingen en veranderingen ondergaan. Als er aan een van de 12 of 30 typologieën gerekend wordt, dan kan een gelijksoortig gebouw van dezelfde typologie flink afwijken. Bovendien, met de berekening met een PGA die 100% afwijkt is het resultaat van die NLTHA-methode niet beter dan met een eenvoudige berekening met de Lateral Force Resistant Methode.

Magnitude of Intensiteit

Dit is de maat voor de sterkte van de aardbeving, meestal uitgedrukt als getal op de schaal van Richter of als momentmagnitude (MMS; ook genoteerd als Mw, waarin w staat voor de verrichte arbeid). Er bestaan verschillende schalen voor de magnitude die echter **niet goed met elkaar te vergelijken zijn**.

⁹⁷ Wanneer de energiekosten voor het maken van bakstenen sterk oplopen, zoals het geval was in de tweede helft van 2022, wordt het wel weer interessant om oude baksteen te hergebruiken, maar de recycling van sloopmaterialen is daarvoor nog onvoldoende ingericht.

⁹⁸ Bij een PGA_{0,2} wordt 20% van de bouwmassa boven de rekenlijn genomen als horizontale belasting.

De magnitude is gebaseerd op het moment van de aardbeving, welke gelijk is aan de starheid van de aarde, vermenigvuldigd met de gemiddelde verzakking van de breuk en de omvang van het gebied dat is verzakt. De MMS schaal werd ontwikkeld in de jaren 1970 als opvolger van de schaal van Richter. De MMS is nu de primaire schaal die door het *United States Geological Survey* (USGS) wordt gebruikt voor het meten van elke grote aardbeving. Net als bij de schaal van Richter, is de MMS een logaritmische schaal. Bij een verhoging van 1 punt op de Mw- of Richter-schaal, is de aardbeving $\approx 10x$ zo sterk. De KNMI gebruikt bij de aardbevingssterkte sterkte aanduiding de Richter schaal **die niet direct vergeleken kan worden met de PGAg voor de belasting op gebouwen.**

Een aardbeving Richter 4,6 (PGAg $\approx 0,22$) is **dus 10x zo sterk** (energie in het epicentrum) als een beving Richter 3,6 (PGAg $\approx 0,085$ Loppersum). Aan het aardoppervlak (epicentrum) betreft dat de horizontale bevingskracht, niet de schoksnelheid. De totale energie van een aardbeving in het hypocentrum gaat in drie richtingen en is **dus 31,6 x zo sterk** met een hele punt verhoging van Richter of Mw. {Eurocode 1.4.2.1} en {Eurocode 1.4.2.3}.

Het grote probleem (voor de Pers en de bevolking) van de KNMI-NPR Richter weergave is dat hun prognoses uit 2015 aangaven dat de aardbevingen een sterkte van Richter $\approx 5,6$ en hoger konden bereiken, waarbij wél verteld werd dat Richter 4,6 **10X** zo sterk is dan Richter 3,6 (2012 Huizinge), maar NIET dat de PGAg slechts $\approx 2X$ zo sterk zou zijn.

Een beving Richter 5,6 is een aardbeving die **100X** zo sterk is als de Huizinge beving. Dat zou een grondversnelling kunnen geven die ongeveer **5X** zo groot was. Gezien de dunheid van het reservoirgesteente is dat niet mogelijk.

Alleen de PGA van de beving is maatgevend voor de gebouwschade en daarom in de NPR vermeld. Er zijn drie PGA-waarden; verticaal, radiaal vanuit het epicentrum en de S-golven van rechts naar links vanuit het epicentrum (slangenbeweging).

Schaal van Richter (energie).	Omschrijving in het Epicentrum	\approx PGAg
1-4 Lichte aardbeving	Type geïnduceerd in de provincie Groningen.	< 0,1
4-6 Matig zware bevingen	Gewapend metselwerk is verplicht volgens de meeste aardbevingscodes	> 0,2
> 6 Zware aardbeving	Komt niet voor in Nederland	> 0,3
Schaal van Mercalli	Omschrijving van de ervaring van mensen.	
I. Niet gevoeld	Slechts door seismometers geregistreerd	0,01
II. Nauwelijks gevoeld	Alleen onder gunstige omstandigheden gevoeld ⁹⁹	0,02
III. Zwak	Door enkele personen gevoelt. Trilling als van verkeer	0,04
IV. Vrij sterk	Door velen gevoelt. Trillingen als van zwaar verkeer. Rammelen van ramen en deuren.	0,06
V. Sterk	Algemeen gevoelt. Opgehangen voorwerpen slingeren. Slappende mensen worden wakker.	< 0,08
VI. Lichte schade	Schrikreacties. Voorwerpen in huis vallen om. Lichte schade aan minder solide huizen.	< 0,1
VII. Schade	Paniek. Schade aan veel gebouwen. Schoorstenen breken af. Golven in vijvers.	< 0,15
VIII. Zware schade	Algehele paniek en schade aan gebouwen. Zwakke bouwwerken gedeeltelijk vernielt.	< 0,2

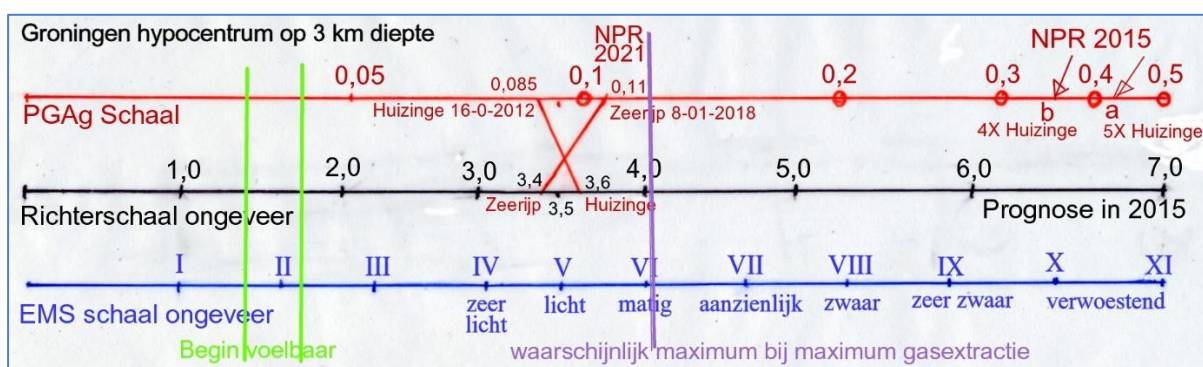
⁹⁹ Bijvoorbeeld 's nachts wanneer men rustig in bed ligt. Overdag komen ze ook voor, maar men voelt ze dan niet. Deze lichte aardbevingen kunnen echter wel invloed hebben op de gebouwde omgeving.

IX.	Verwoestend	Veel gebouwen en funderingen zwaar beschadigt. Ondergrondse pijpleidingen breken.	0,3
X.	Buitengewoon verwoestend.	Verwoesting van vele gebouwen. Schade aan dammen en dijken. Grondverplaatsing en scheuren in de aarde	>0,4

Vaststelling van de intensiteit van Mercalli vindt achteraf plaats via waarnemingen van schade en met behulp van enquêtes; de **gevoelswaarde** speelt hier dus de hoofdrol. De intensiteit hangt af van de magnitude van de beving, de bodemgesteldheid en de afstand en diepte tot het hypocentrum. Deze gegevens worden weergegeven op een intensiteitenkaart.

Bij de aardbevingen in Groningen wordt door de KNMI hoofdzakelijk de Richterschaal gebruikt. Omdat alle bevingen uit dezelfde 3km diepte voortkomen, zijn ze goed met elkaar te vergelijken, maar niet met tektonische aardbevingen. **In berekeningen wordt alleen de PGA gebruikt.**

De verschillende schalen zoals van Richter (Energie, M_w), EMS (schade) met Mercalli (gevoel en schade), en de PGA-zonering van de Eurocode 8 lopen niet gelijk op. Alle PGA's (acceleratie) van tektonische en Groningse geïnduceerde bevingen zijn wel met elkaar te vergelijken, onafhankelijk van de diepte van het hypocentrum; daarom zijn die vermeld in de Eurocode en de NPR.



Figuur 1-74. De PGg wordt sterk beïnvloed door de diepte van het hypocentrum.

De Richterschaal heeft alleen met de kracht van de aardbeving te maken (+1 punt = 10X zo sterk) en kan vanwege de relatief dunne zandsteenlaag niet erg groot worden. De Richterschaal heeft weinig met de grondversnelling te maken. De Zeerijpbeving had dus minder kracht dan de 2012 Huizinge beving (dubbele schok), maar wel een grotere PGA dan die Huizinge beving.

Maximum aardbeving, Mmax

Dit is bij tektonische aardbevingen de (theoretisch) maximaal waarschijnlijke aardbeving in een bepaald gebied (Mmax in PGA), berekend op basis van gegevens uit het verleden en aangepast op basis van risicoberekeningen, verhoogd met toleranties en onzekerheden en soms met extra "veiligheids" zoals voor lange periodes (*design-earthquake*). Deze Mmax bij tektonische aardbevingen heeft een geschatte kans dat deze ook werkelijk voorkomt (bijvoorbeeld een kans van 10% in 2475 jaar). Op deze Mmax-PGA wordt dan ontworpen, zodat het gebouw 'net niet instort'. Deze ontwerpwaarde voorkomt niet dat het gebouw scheurt of *total-loss* wordt. Wanneer de risico's niet duidelijk kunnen worden gedefinieerd, wordt er een verhogend percentage voor die onzekerheid toegepast. Hoe meer onzekerheden, hoe hoger de grondversnelling.

Voor het bepalen van de Mmax bij geïnduceerde aardbevingen is niet bepalend hoe zwaar die **kunnen** morden, maar hoe zwaar die **mogen** worden. Dit hangt af van de kwaliteit van de gebouwde omgeving, de infrastructuur en de industrieën.¹⁰⁰ De methodologie om van de verschillende typologieën de accepteerbare schadeniveaus vast te stellen is dan de enige juiste.

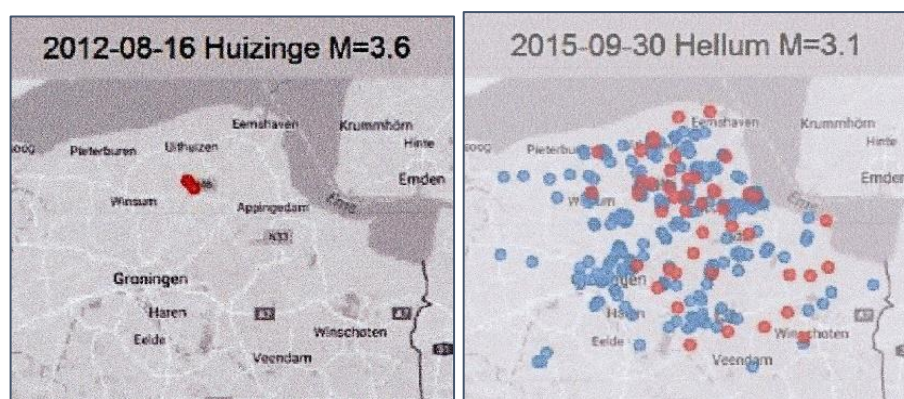
¹⁰⁰ Bij gevaarlijke industrieën is het produceren van zware aardbevingen niet wenselijk als door die aardbevingen schadelijke stoffen of straling vrijkomt die nog meer schade kan aanrichten onder de bevolking dan de kracht van de

Wanneer de toekomstige aardbevingen of schokken niet sterker worden dan de 2012 Huizinge beving (PGA_g = 0,085 of < 0,1) zijn er volgens de NPR nauwelijks seismische versterkingen noodzakelijk. Er stort dan namelijk niets in. Echter, er zullen dan wel veel scheuren blijven optreden bij meerdere schokken. Het versterken tot op het NPR-niveau van PGA_g 0,2 is dan een goede maatregel die de veiligheid van de bevolking garandeert.

Meetnetwerk

Met het seismologisch meetnetwerk van accelerometers en boorputseismometers kunnen de KNMI en TNO voor de NAM de aardbevingen registreren, zowel aan het aardoppervlak als op grote diepte. Ook aan de funderingen van gebouwen zijn in de provincie Groningen een paar honderd accelerometers geplaatst. Door de informatie van de diepe metingen te koppelen aan de metingen aan het aardoppervlak kan men bepalen hoe de relatie is tussen deze twee metingen. De seismografen aan de funderingen geven echter ook de gebouwresponse (natrillen) weer voor de verschillende soorten constructies; dit moet gecorrigeerd worden.

Figuren 1-75. Uitbreiding van het meetnetwerk van de KNMI. KNMI (rood) en TNO (blauw) sinds 2012 tot en met 2015. Door het grote meetnetwerk kunnen betere data verzameld worden en nauwkeurige kaarten worden gemaakt.



Momentsterke structuur

Momentvaste hoofddraagconstructie; (*moment-resisting frame*). Een gebouwconstructie biedt weerstand aan horizontale krachten omdat de onderdelen zoals muren, balken en kolommen weerstand bieden tegen elastische buiging. Na de belasting neemt de draagconstructie structuur weer haar oorspronkelijke vorm aan. Een momentsterke hoofddraagconstructie met elasticiteit heeft een hogere q -factor dan een stijve doosconstructie (baksteen woningen). Balk- en kolomstructuren die bij een overbelasting blijvend vervormen (maar niet breken) noemt men taai (*ductiel*). Een taai gebouw heeft een hogere q -factor dan een gewone momentsterke structuur.

Nationale Coördinator Groningen (NCG).

Hans Alders was NCG in 2015 door de Minister EZ aangesteld vanwege de aardbevingsproblematiek in Groningen, met als taak na te gaan waar versterking nodig is en hoe deze aangepakt moet worden. Hij formeerde de organisatie en nam in 2018 afscheid. Op 17 juni 2019 is dit instellingsbesluit gewijzigd. De NCG is daarna de uitvoeringsorganisatie die verantwoordelijk is voor de opnames, beoordelingen en de bouwkundige uitvoering van de reparaties en versterkingen. Kort daarna werd de IMG opgericht die alleen het herstel (zonder versterking) ging managen en uitvoeren. Vanaf 1 januari 2020 is NCG de enige management en uitvoeringsorganisatie voor de versterkingsopgave.¹⁰¹

aardbeving zelf. Bij infrastructuur moet bijvoorbeeld voorkomen worden dat een belangrijke dij inzakt en vervolgens een groot gebied onder water komt te staan wat meer materiele schade en slachtoffers oplevert dan alleen de aardbeving.

¹⁰¹ <https://www.nationaalcoordinatorgroningen.nl/over-ons/instellingsbesluit>

Niet-constructief gebouw onderdeel

Niet constructief onderdeel. {Eurocode 8: 1.4.2.12}

- Constructief onderdeel, niet behorend tot de hoofddragstructuur van het gebouw. Een constructief onderdeel, dat, ofwel wegens gebrek aan sterkte of wegens de manier waarop het verbonden is aan de hoofdstructuur, niet mag worden wordt beschouwd als een draagconstructie dat weerstand biedt aan een aardbevingsbelasting ter voorkoming van voortschrijdende instorting. Zie ook {Eurocode 8: 4.3.5}.
- Niet-constructief onderdeel. Architectonisch of elektrisch onderdeel, dat, ofwel wegens gebrek aan sterkte ofwel wegens de manier waarop het verbonden is met de bouwconstructie bij een aardbeving kan leiden tot een of meer slachtoffers. Zie ook {Eurocode 8: 4.3.6}

De niet-constructieve onderdelen mogen **geen nadelige belastingen opleveren aan de constructie**.

Deze onderdelen tellen dus niet meer voor de sterkteberekening van het gebouw en zijn ook gebouw onderdelen die bij de maximale aardbeving wel kunnen of mogen instorten /afvallen.

Vóór 1960 werden zelden alle onderdelen van een gebouw op sterkte en verbinding berekend. Vóór 1940 en helemaal vóór 1900, werd hoofdzakelijk op ervaring gebouwd betreffende funderingen, muurdikte en raamoverspanningen zoals lateien; ook in de stad Groningen. Later werd het verplicht dat de verbindingen tussen niet constructieve elementen en constructieve onderdelen meer dan voldoende sterk waren en waar nodig ook ductiel waren (vervormbaar bij overbelasting).

Figuur 1-76. (Internet) In Christchurch, New Zealand, was het neerstorten van de niet constructieve elementen van oudere gebouwen die niet volgens de seismische code waren gebouwd, zoals façades, topgevels boven winkelgalerijen, de belangrijkste oorzaak van dodelijke slachtoffers onder de bevolking. Vooral invulpanelen bij space-frame gebouwen of gewapend betonconstructies moeten speciale aandacht krijgen zodat ze ductiel aan de hoofdconstructie zijn verbonden.



NLTHA. Non-Linear Time-History Analysis

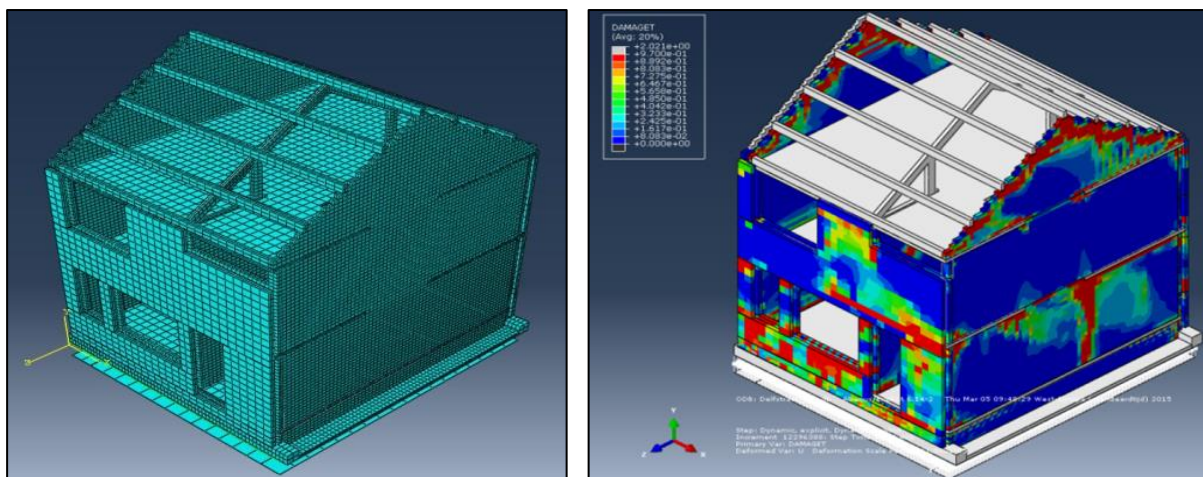
Deze (Niet Lineaire Tijd-Geschiedenis Analyse, NLTHA) rekenmethode is gebaseerd op de tijdgebonden reactie van het gebouw tijdens een aardbeving. Het verticale en de twee horizontale en grondsignalen van een aardbeving worden hierbij toegepast op de fundering.¹⁰² Om deze methode te kunnen toepassen en uitrekenen wordt het gehele gebouw in kleine stukjes berekend (bijvoorbeeld 30 cm x 30 cm) waarbij de elasticiteit en de sterkte van elk stukje wordt ingevoerd en diens verbindingen (taai, elastisch, flexibel) met het aansluitende stukje. Dit betekent dat er duizenden tot tienduizenden stukjes ingevoerd moeten worden; dit is specialistenwerk en duurt weken (en is dus heel duur).

Speciale hiervoor ontworpen computerprogramma's voeren de vele berekeningen uit van elke trilling en van alle stukjes¹⁰³. Hierdoor kan men theoretisch zien welke punten of zones in een gebouw het

¹⁰² In verschillende situaties werd in Nederland een hoog grondsignaal gebruikt (PGA_g > 0,3) van een aardbeving in Turkije die verder weinig met de Groningse aardbevingen te maken had.

¹⁰³ Voor het invoeren en uitrekenen van het 13 verdiepingen hoog flatgebouw Dijkzicht waren verschillende maanden nodig. In een dergelijk geval moeten de bouwtekeningen bestudeerd worden en metselwerk of betonwerk testen worden

zwakste zijn en het (gaan) begeven. Voor nieuwe of bestaande gebouwen zijn dat dan de locaties waar de versterkingen dan moeten worden toegepast of het ontwerp aangepast.



Figuren 1-77. Voorbeeld van het opdelen van een rijtjeswoning in kleine stukjes van 30 x 30 cm en het resultaat van een NLTHA door Zonneveld Ingenieurs. Rood zijn schadezones in metselwerk, zoals scheuren.

De Commissie Meijdam heeft 14 december 2015 een advies¹⁰⁴ uitgebracht over ‘Omgaan met de risico’s van geïnduceerde aardbevingen’. In dit advies wordt gesteld dat deze Commissie pleit voor het gebruik van een precieze rekenmethode, de zogeheten ‘*finite elements*’-methode (NLTHA), omdat dit voldoende betrouwbaarheid zou opleveren. Voor bestaande gebouwen kan het hele gebouw 3D gescand worden en digitaal uitgetekend.

De verfijning van de rekenmethode op basis van een te zwaar aangenomen PGA-waarde is niet relevant. Bovendien, bij oudere woningen moet er een gok gedaan worden naar de sterkte en de constructie details. Een paar weken computer rekenen via de NLTHA levert hetzelfde bouwkundige resultaat op als een half uurtje rekenen op één A4. Een praktisch inzicht in de algemene gebouwconstructie is dan sneller en betrouwbaarder.

Voor lage en stijve baksteen gebouwen is de NLTHA-methode nauwelijks relevant. Deze methode is sinds 2015 in Groningen voor duizenden woningen toegepast¹⁰⁵. In een dergelijk geval kan ook met de eenvoudige statische methode worden gerekend.

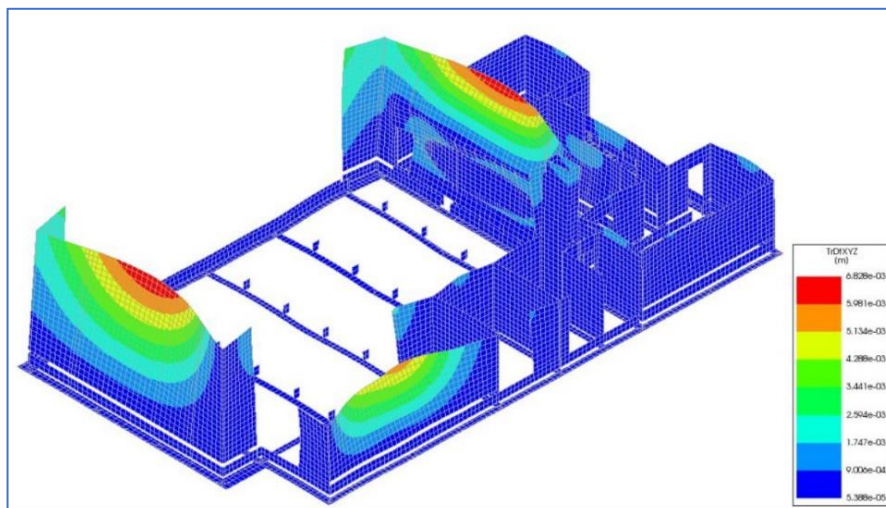
uitgevoerd om de juistheid van de data zo goed mogelijk te benaderen. Het feitelijke uitrekenen moet gebeuren met een trilling signaal dat overeenkomt met het type schokken en de grondsoort die zich in de provincie Groningen voordoen. Deze informatie werd in 2015 afgeleid van tektonische bevingen in Turkije, maar die waren aanzienlijk hoger dan wat zich in Groningen zou kunnen voordoen.

¹⁰⁴ Commissie Meijdam Eindadvies 14-12-2015 <https://zoek.officielebekendmakingen.nl/blg-646523.pdf>

¹⁰⁵ De oorsprong van deze besluitvorming ligt waarschijnlijk in het rapport van de Commissie Meijdam 2015 waarin deze methode voor de typologie benadering werd aanbevolen als zijnde 100% precies (hetgeen dus uiteindelijk niet zo is). Zie: <https://zoek.officielebekendmakingen.nl/blg-646523.pdf>

Figuur 1-78. Afbeelding van AVECO van de NLTHA-berekening van een school.

De bakstenen topgevels laten veel vervorming zien (blauw-groen, en zullen daardoor het eerste beschadigen (oranje-rood)).



Bovenstaand is een analyse van een schoolgebouw, maar de topgevels zijn hier (in de berekening) niet verbonden aan de dakconstructie. Het effect is dat deze topgevels gaan zwiepen en afbreken. De bevestigingsbelastingen moeten in verschillende richtingen uitgevoerd worden. In het epicentrum (gemeente Loppersum) staat het niet vast vanuit welke richting de aardbeving komt.

Noodmaatregelen

Maatregelen die zijn of worden genomen om instortingsgevaar te voorkomen, of om ergere schade aan een gebouw te voorkomen. In sommige situaties wordt de noodzaak geïdentificeerd met een RVS of EVS. De belangrijkste maatregelen zijn het stutten van constructies of gebouwen om het omvallen van muren te voorkomen, en het afzetten van het loopgebied rondom het gebouw zodat gebouw onderdelen niet op personen kunnen vallen.

Figuren 1-79. Afzetten rondom een risicovolle gevelconstructie. De flexibele kap geeft geen steun (wel extra belasting) op de al grote massa van de hoge kopgevel. Rechts: Stutten van een oude slechte zijmuur.



In de provincie Groningen werden in veel gevallen noodmaatregelen genomen bij oude boerderijen, omdat de houten kapconstructies erg flexibel zijn en bij een aardbeving de stijve bakstenen zijmuren wegdrukken. Bij oude woningen komen ook noodmaatregelen voor, inclusief het plaatsen van steigers en stempels in het gebouw ter ondersteuning van vloeren die los geraken. Een andere noodmaatregel is het uit huis plaatsen van de bewoners. Dit kan soms wettelijk door de plaatselijke gemeente moeten gebeuren, op last van Bouw en Woning Toezicht (BoWoTo).

Nederlandse Praktijk Richtlijn, NPR9998

De Eurocode 8 geeft de berekeningsmethode aan voor aardbevingsresistent bouwen. Deze code geldt voor heel Europa en heeft per land een kaartbijlage die de maximale aardbeving per regio in dat land aangeeft. De Eurocode 8 is weer gebaseerd op de Amerikaanse ACI 318-71 en de daaropvolgende

verfijningen met betere rekenmethoden voor tektonische aardbevingen. De NPR9998:jaartal is in eerste instantie een vertaling van de Eurocode 8. Ingenieurs kunnen ook de Engelstalige Eurocode 8 makkelijk gebruiken. Voor niet-bouwkundig of wiskundig onderlegde professionals is de NPR een moeilijk te begrijpen document.

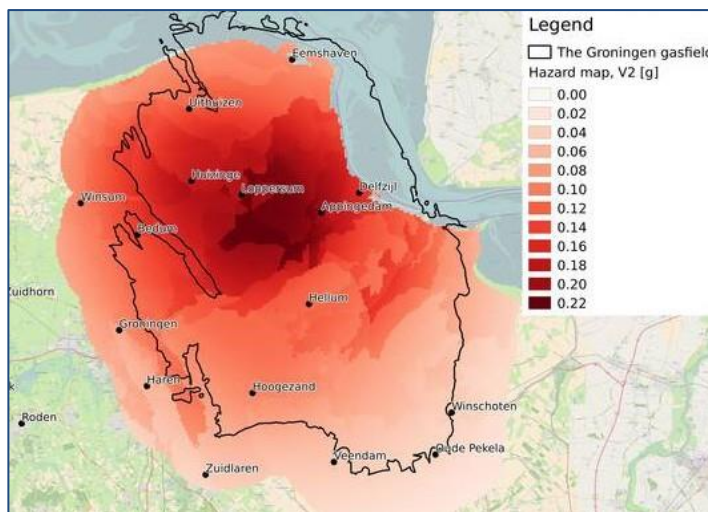
De NPR geeft vier verschillende rekenmethodes aan voor de berekening van een gebouw. Daarvan is de statische methode het eenvoudigste en goed voor gewone constructies zoals de Groningse laagbouw. De NLTHA is de meest ingewikkelde en geschikt voor hoogbouw (> 10 etages).

De NPR9998:2020 geeft via een nieuw Home Webtool de PGAg per locatie en de herhalingsstijd periode aan <https://seismischekrachten.nen.nl/map.php>. Bij een locatie waarbij de PGAg <0,05 bedraagt bij een herhalingsstijd van 95 jaar is geen speciale seismische sterkteberekening nodig. Veel woningen kunnen wel versterkt worden zodat ze bij een PGAg 0,2 weinig schade oplopen.

Figuur 1-80. 2014 Arup dreigingskaartje met een PGAg max 0,022.

Dit was een vrij reëel kaartje, waar ook nog een flinke veiligheidsmarge in zat voor het epicentrum gebied tussen Ten Boer en Loppersum.

In 2018 toen voor de derde keer de PGA-waarde werd verlaagd, zou alleen nog in het kerngebied van de regio (gemeente Loppersum en zuid en zuidoost daarvan) de maximale grenswaarde van PGAg = 0,13 bereikt worden.

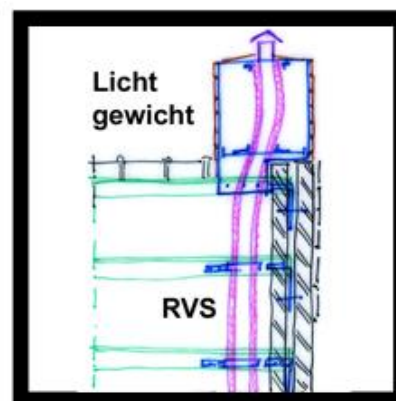
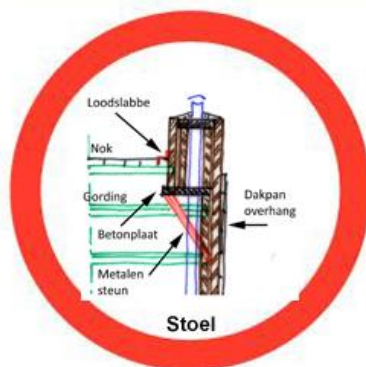


Onveilige situatie

Een onveilige situatie in relatie tot aardbevingen is een situatie die bij extra of meerdere schokken of bij zwaardere aardbevingen kunnen leiden tot het afvallen van gebouwonderdelen of het instorten van gebouwen of gebouwonderdelen (e.g. schoorstenen) of vloer- en dakconstructies kan bezwijken.

Deze onveilige situaties kunnen vaak worden waargenomen tijdens een RVS, (*rapid visual screening*), waarna met een EVS (*extended visual screening*) ook **binnen in het gebouw gekeken kan worden** of er reële risico's bestaan. Na een bestudering van de bouwkundige details kan deze onveilige situatie worden weggenomen. Bij een hoog-risico situatie kunnen er tijdelijk stutten worden aangebracht totdat de onveilige situatie is weggenomen. Het wegnemen van een onveilige situatie is nog geen bouwkundig versterken.

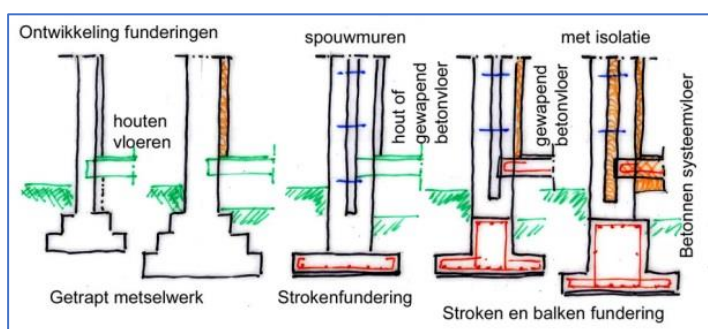
Figuren 1-81. Zware bakstenen schoorstenen zijn risicovol. Een zware schoorsteen op flexibele houten kapconstructies en op een stoel kan vervangen door een veilige lichtgewicht schoorsteen. De gemetselde topgevel en de verankering blijven problematisch, vandaar dat de tweede schets geen blauw kader heeft.



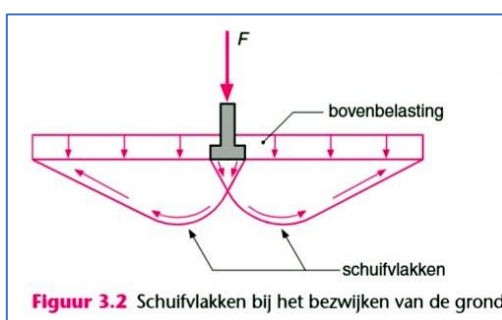
Op staal (gebouwd of gefundeerd)

De uitdrukking 'op staal' is afgeleid van 'op stal' wat in het oud-Germaans rust betekent (het paard staat op stal). Het heeft niets met staal (ijzer) te maken en is in veel gevallen geen sterke dragende fundering die extra belasting kan opnemen. Extra funderingsbelasting ontstaat door de verticale en horizontale schokken van de aardbeving (kanteffect bij horizontale belasting). De verticale trillingen en schokken kunnen op slappe gronden tot zetting leiden. Dit is vooral het geval bij funderingen die 'op evenwicht' zijn gebouwd, waarbij de grond onder de funderingen kan afschuiven door de aardbeving en andere (verkeers-)trillingen. Bij voorkeur wordt fundering 'op staal' op een vast zandpakket gebouwd, maar in de provincie Groningen is dit zelden het geval, vandaar dat op natte en elastische kleigrond en veen veelvuldig zettingen voorkomen.

Bij een fundering 'op staal' die op natte grond staat kan het grondwater onder de fundering uitgeperst worden, waardoor deze fundering zakt en scheuren in de baksteen muren veroorzaakt¹⁰⁶. De fundering 'op staal' is in de loop der jaren verbeterd door de toevoeging van gewapende betonstroken, en later betonstroken met geïntegreerde balken (schets); geen funderingen op palen.

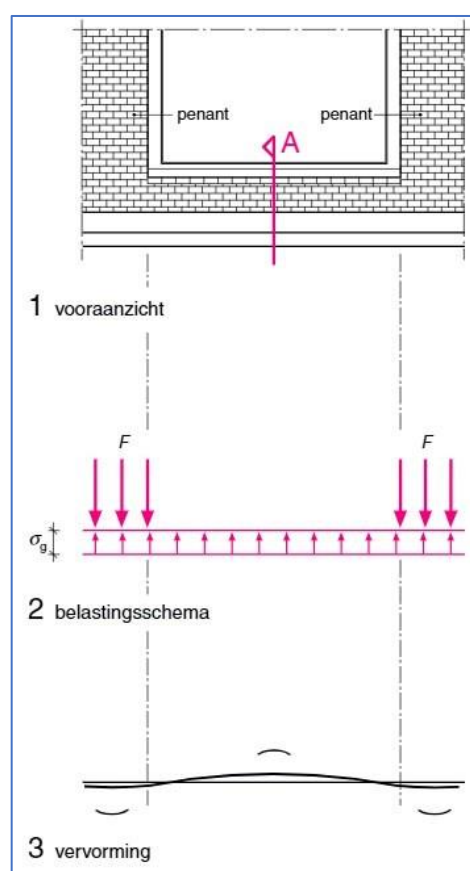


Figuren 1-82. Funderingen op staal moeten breder worden aangelegd. Dit is vooral zo bij hogere gebouwbelastingen.



Figuur 3.2 Schuifvlakken bij het bezwijken van de grond

Door de toepassing van funderingen op stroken en balken ontstaan er minder scheuren in de funderingen, maar mogelijk wel hoger in het gebouw (jaren '70-'80).¹⁰⁷



Permeabiliteit

Doorlaatbaarheid van een materiaal (gerelateerd aan porositeit). Dit houdt verband met het aantal en grootte van de kanaaltjes tussen de poriën in het zandsteen. Er zijn een groot aantal boorgaten (300) voor de aardgasextractie in Groningen. Het gas uit de omgeving van die boorgaten stroomt vanwege de permeabiliteit langzaam naar die extractie punten.

¹⁰⁶ Een zakking van 2 mm van een kant van een fundering op staal zal in de muur erboven een scheur van 2 mm opleveren. Bij ongelijke fundering zoals bij kelders treden deze scheuren bijna altijd op (en kanteling).

¹⁰⁷ Tekeningen uit <https://docplayer.nl/64563105-Jellema-2-onderbouw-voorwerk-indd-20-25.html>.

Wanneer de compactie toeneemt (door gaswinning), kan ook de permeabiliteit van dat zandsteen iets afnemen, waardoor de drukverschillen minder snel nivelleren. Het langzamer onttrekken van het aardgas zal dus de drukverschillen doen afnemen en de compactie over de tijd spreiden, en ook schokken op de breuklijnen doen afnemen.

Piek grondversnelling, PGA

PGA, Peak Ground Acceleration {Eurocode 8: 1.4.2.2}

De hoogste waarde van de versnelling van het maaiveld tijdens een aardbeving. Deze wordt uitgedrukt in PGA_g of $PGA(g)$, waarbij de g de zwaartekracht versnelling is van $9,81 \text{ m/sec}^2$. Soms is de waarde aangegeven in pga of $PGA \text{ m/sec}^2$; in deze laatste notaties is de waarde ongeveer 10 maal de PGA_g -waarde. Bij een notatie van de sterkte in PGA moet de m/sec^2 zijn vermeld.

Omdat over de jaren sinds 2013 de PGA_g -waarde steeds verder verminderde, werd het invloedgebied waar nieuwe aardbevingen zich voelbaar voor zouden doen steeds kleiner (voor mensen voelbaar). Gebouwen blijven echter wél invloed ondervinden van de kleinere bevingen. In verband daarmee zouden de preventieve versterkingen en de bouwkundige herstelkosten volgens de NPR ook in een steeds kleiner gebied noodzakelijk zijn.

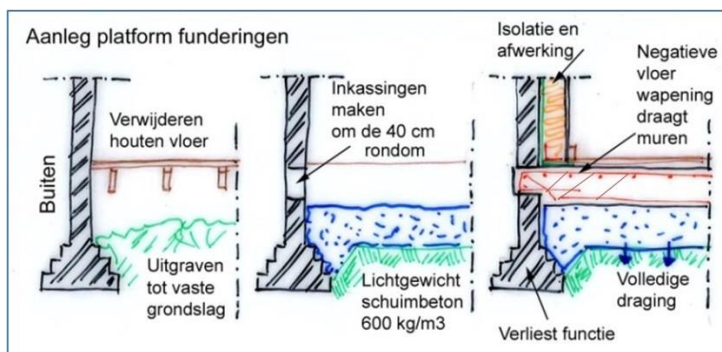
De kracht van de aardbeving van 16 augustus 2012 in Huizinge was geschat op $PGA_g = 0,085$ (of $pga 0,0085 \text{ m/sec}^2$) iets minder dan $PGA_g = 0,1$. De ontwerpaardbeving uit de NPR geeft de ontwerpbelastingen per locatie in de provincie Groningen om instorten te voorkomen.

Deze NPR- PGA wordt aangegeven als piekgrondversnelling a_gS op maaiveld niveau. De a_gS is inclusief de bodemfactor. De bodemfactor wordt bepaald aan de hand van de bovenste 30 m van de grond en de grondsoorten en grondwater wat zich in die lagen bevinden. Elastische (klei) gronden en slappe veengronden hebben een andere invloed op de bodemfactor dan een vaste zandgrond en kunnen voor extra en langere natrilling zorgen, maar ook voor demping.

De feitelijke sterkte van de aardbeving (voor de berekening van gebouwen) wordt alleen aangegeven in PGA . Daarom is het dreigingskaartje van de NPR ook alleen in PGA weergegeven.

Platform fundering, Plaatfundering

Volledige plaatfundering onder het gehele gebouw, ook wel 'evenwichtsfundering' genoemd. Door dit ontwerp veroorzaakt het gebouw een lage geheel gespreide druk op de grond en is het zettingsrisico sterk vermeden, en daarmee ook scheurvorming in muren vanwege gedeeltelijke zetting. Deze plaatfundering (soms op schuimbeton) kan bij bestaande gebouwen worden ingebracht door op regelmatige afstanden de muren in te kassen en daar een dragende betonvloer in aan te brengen met langs alle muren negatieve wapening in die betonvloer.



Figuren 1-83. Foto en schets van de aanleg van een platformfundering

Links. In een bestaand gebouw wordt de betonvloer op de grond aangelegd en ingetand in de draagmuren. Door onder het hele gebouw een volledig dragende plaat te maken wordt de gronddruk extra verlaagd.

Rechts. Om de grond onder het gebouw beter draagkrachtig te maken kan een laag schuimbeton worden toegepast. Het schuimbeton kan echter niet de muren dragen. Zie ook Hoofdstuk 4.

Bij zwakke funderingen en seismische versterking wordt de bovenvermelde methode soms toegepast. Voor het versterken van oude bakstenen gebouwen met fundering op staal die plaatselijk verzakingsverschijnselen vertonen is dit een uitstekende versterkingsmethode, maar beschermt de bovenliggende constructie niet tegen de horizontale belastingen van een aardbeving. Aanvullende muur en diafragma versterkingen blijven dan noodzakelijk.



Figuren 1-85. Bij plaatfundering zit de betonwapening bovenin.

Links. Bij een betonbalk ontstaat er een negatief moment bij de inklemming in een muur. Hier wordt dan 'negatieve' wapening toegepast (rood). Bij een plaatfundering is de belasting van het gebouw rondom langs de randen van de vloer, dus het omgekeerde van een vrijdragende betonvloer. In de hele bovenkant van de plaatfundering moet dan negatieve wapening komen. Rechts. Toepassing van schuimbeton ná fundering herstel. <https://vandijkmaasland.nl/expertises/schuimbeton/woningbouw/>

Primaire seismische gebouw onderdelen

Primaire seismische elementen zijn de hoofddragconstructie. {Eurocode 8: 1.4.2.13}. Elementen of onderdelen die beschouwd worden als deel van het constructief systeem dat de seismische belasting weerstand biedt; de gehele dragconstructie. De sterkteberekening van een gebouw wordt voor deze onderdelen gemaakt. De primaire seismische onderdelen (draagmuren, kolommen, portalen, diafragma's) moeten versterkt worden om instorten van het gebouw te voorkomen. Bij de maximale aardbeving mogen deze primaire elementen (b.v. kolommen) niet bezwijken. Wanneer de feitelijke bevingen een hogere PGA hebben dan de maximale van de seismische code, moeten ze zó ontworpen zijn dat ze ductiel bezwijken. In andere woorden: dat ze verbuigend en langzaam bezwijken en niet plotsklaps instorten. (zie Ductiel)

Ratio (*aspect ratio*)

Verhoudingsgetal tussen de lengte en de hoogte van bijvoorbeeld een afschuifmuur (*shear wall*). Ook de lengte-breedte verhouding of de verhouding tussen een overspanning en de dikte van een constructie. De ratio wordt toegepast bij een RVS-inspectie voor de snelle inschatting van verhoudingen van constructies zoals raampenanten, vrije muurlengtes en hoogtes van schoorstenen. Wanneer deze onderdelen buiten de aanbevolen ratio vallen, moeten ze op hun sterkte berekend worden en eventueel versterkt.

Figuur 1-86. De ratio van de muurpenanten in dit gebouw. Het rood omliggende muurpenant rechts heeft $b:h = 0,2$ en is daardoor erg zwak. Door sterke constructieve glaspanelen in de kozijnen te lijmen wordt de verhouding inclusief de naastliggende muurpenanten (groen omliggend ernaast) $b:h = 0,8$ en ongeveer 4X zo gunstig. Het stijfste penant neemt dan de belasting op de muur op. Bij de beoordelingen van schoorstenen die alleen op de basis staan is een ratio van $b:h = 0,5$ al risicovol omdat er vanwege de loodslabben geen verbinding is met het onderliggende metselwerk.



Voor verschillende typologieën kunnen de grenswaarden berekend voor constructie onderdelen zoals muren en schoorstenen. Met een sjabloon kan met een RVS snel bepaald worden of de betrokken constructie bij een PGAg 0,2 een risico kan opleveren.

Reservoir, reservoirgesteente

Het reservoirgesteente in Groningen is het 3 km diepliggende zandsteen dat voldoende porositeit heeft, waardoor het gas en vloeistoffen kon bevatten. Door de inwendige permeabiliteit is verplaatsing van dit gas mogelijk. De term wordt veelvuldig gebruikt.

Reservoirdruk

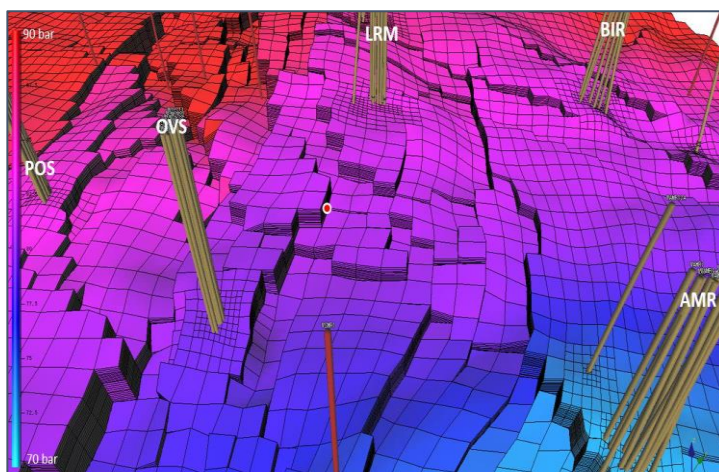
Door bij elk boorgat de drukafname in het reservoir over het verloop van tijd te meten, kunnen drukverschillen in het reservoir worden geregistreerd. Hoe groter de drukverschillen tussen aansluitende secties, hoe groter de kans op aardbevingen of hoe meer schokken er zich kunnen voordoen.¹⁰⁸

Figuur 1-87. De bruine lijnen zijn de pijpen van de boorlocaties.

Door een snellere gaswinning in AMR-zone (rechts onder) dan uit de andere boorgaten, is de reservoirdruk daar het laagste.

Het minimaliseren van het drukverloop door minder onttrekking zal vermindering van het aantal en de sterkte van schokken opleveren.

De rode punt is het hypocentrum van de aardbeving van 21 augustus 2017 bij Appingedam. Verticale schaal van deze grafiek is 10 x horizontale schaal.



Door de gasonttrekking verlaagt de inwendige gasdruk in dat zandsteen. De gezamenlijke weerstand van de gasdruk met de sterkte van het poreuze zandsteen verminderd dan. Wanneer de sterkte of elasticiteitsgrens van dat zandsteen overschreden wordt, volgt plotselinge verkrumpling van de zandsteen (compactie), in de vorm van een schok (aardbeving). Tegelijkertijd wordt de gasdruk dan

¹⁰⁸ Kaart met 3D weergave van de drukverschillen in het reservoir en langs de breuklijnen. Van NAM website, zie: https://www.nam.nl/nieuws/2017/rapport-aardbevingen-gebied-appingedam-loppersum/_jcr_content/par/textimage.stream/1504694438195/cb091a285690c263e3d9cb61f1db6778f3e3668676f20943a8d8226df13e531b/special-report-appingedam-on-27th-may-2017.pdf

op die plaats tijdelijke verhoogd. Wanneer er een blijvend verschil van reservoirdruk ter plaatse van de compactie en het naastliggende gebied blijft ontstaan zullen naast de compactie zone nog een serie kleinere compacties volgen. Die grootte en frequentie van die extra bevingen hangen af van de structuur en de taatheid van het bovenliggende zoutsteen. Wanneer de reservoirdruk sterk is gedaald, spuit het gas er niet meer uit.

Richter, schaal van

In 1935 ontwierp de Amerikaanse seismoloog Charles Richter zijn magnitudeschaal. Deze is gebaseerd op de sterkte van de trillingen, zoals die gemeten wordt op het seismogram in het epicentrum en uitgedrukt op een logaritmische schaal. De magnitude wordt berekend aan de hand van de grootte van de uitslagen van de registratie door verschillende seismografen van die aardbeving. De seismoloog (KNMI) past hierop correcties toe om de invloed van de afstand tussen epicentrum en het seismisch station in rekening te brengen. Met het toenemen van de afgelegde afstand verliezen de seismische golven door geometrische spreiding en absorptie een deel van hun trilling amplitude. De amplitude van Richter begint bij nul, en elk volgend geheel getal betekent een tienvoudige toename in de golfamplitude (logaritmisch). Een beving van 3 op de schaal van Richter produceert dus horizontale golven die 10X keer zo sterk zijn als die van een schaal 2. Een aardbeving Richter 4 is dus 100X zo sterk als een Richter 2.¹⁰⁹

Deze tienvoudige toename per schaalnummer in de golfamplitude vertegenwoordigt een >31X toename in de hoeveelheid vrijgekomen energie in het hypocentrum. Die energie vanuit het hypocentrum gaat echter in alle richtingen, waarbij slechts de beweging die naar het aardoppervlak gaat relevant is. De Richterschaal is niet direct gerelateerd aan de PGA-schaal. Er zijn drie richtingen in de PGA-schaal, waarbij de horizontale amplitude het belangrijkste is voor de gebouwbelasting. Deze horizontale belasting wordt beïnvloed door de afstand tot het epicentrum en de grondsoort.

De aardbevingsbelasting op gebouwen wordt uitgedrukt in PGA. Een gebouwschade is afhankelijk van veel factoren zoals, grondsoort, fundering type, amplitude, frequentie en duur van de schokken, en van de stijfheid of elasticiteit van een gebouw, de gebouwvorm en andere aspecten. De geïnduceerde aardbevingen zijn helemaal **NIET te vergelijken met tektonische aardbevingen**. Tektonische aardbevingen van Richter Mw 4.0 die uit een diepte van 15 – 20 km komen tellen nauwelijks mee, terwijl een oppervlakkige aardbeving van Richter Mw 4.0 in Groningen al heel erg veel schade kan opleveren aan oude bakstenen gebouwen. In Nederland zijn gebouwen hier niet op berekend.

Respons spectrum

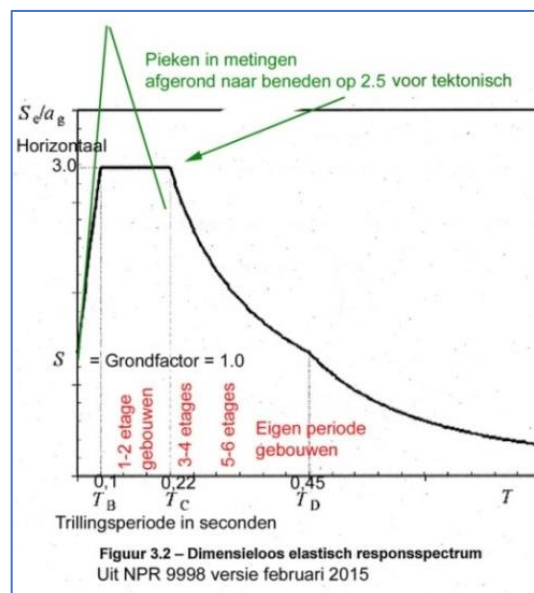
Respons spectrum of '*Reaction diagram*'. {Eurocode 8: 1.4.2.5} Di is de maximale respons (reactie) van een constructie op een aardbeving als functie van de eigen periode (slingertijd) of eigen frequentie (afhankelijk van hoogte, massa en elasticiteit) op basis van een 5% demping door de elasticiteit of taatheid van de grond.

¹⁰⁹ De beving van 16 augustus 2012 te Huizinge was Richter 3,6. Als de maximale beving volgens de NPR van 2015 Richter 5,6 zou worden, dan zou dat betekenen dat aan het oppervlak die beving ongeveer 100X zo zwaar zou zijn als de Huizinge beving met Richter 3,6.

Figuur 1-88. Het Response spectrum of reactie diagram. Het reactie diagram combineert de grondsoort met de hoogte en de eigen trillingsfrequentie van het gebouw. Lage gebouwen zijn daarom extra belast.

Elastische kleigronden kunnen een grotere demping van de schok hebben wat gunstig is voor de berekening. De NPR geeft meer duidelijkheid in de berekeningen met een grondsoorten kaartje van de bovenste 30 m voor de provincie Groningen.

De lage en brosse bakstenen gebouwen in de provincie Groningen hebben een **nadelig respons spectrum** en lopen daarom sneller schade op dan flexibele (houten) gebouwen of hogere gebouwen.



De Eurocode 8 (NPR9998) geeft verschillende methodes aan om deze eigen gebouwfrequentie te berekenen. Een eenvoudige methode is $T_1 = C_t * H^{3/4}$ Formule (4.6). Wanneer de aardbeving frequentie gelijk is aan de eigen gebouwfrequentie kan bij langdurige aardbevingen gebouwresonantie ontstaan. Dit is niet het geval in Groningen omdat de duur van de schokken heel erg kort is (tienden van een seconde). Bij een gebouw op *Base-isolation*, wordt de zware schok van de aardbeving niet op het bovenstaande gebouw over gedragen, maar vertraagd en omgezet naar een veel kleinere beweging.

Risico overlijden

In de kennis en statistieken over ongevallen zoals verkeersongevallen, woningbranden, van de trap of steiger vallen en dergelijke, wordt een toelaatbaar ongevalsrisico met dodelijke afloop berekend van 10^{-5} . Dit wordt ook zo in de Europese en Nederlandse wetten toegepast. Dat wil zeggen dat een dodelijk ongeval van 1 op de 100.000 een acceptabele norm is waarbinnen gebleven moet worden. De overheid probeert dan ook om regels en veiligheidseisen te stellen zodat deze waarde 10^{-5} niet overschreden wordt. Deze normberekening werd ook toegepast op de berekening van de risico's met betrekking tot de geïnduceerde aardbevingen.

Echter, als het gaat over het instorten van woningen (met dodelijke gevolgen), zou dat betekenen dat met een risicofactor 10^{-5} er in Nederland (> 17 miljoen inwoners) niet meer dan 170 doden per jaar zouden mogen vallen vanwege instortende gebouwen of 5 doden per jaar voor de provincie Groningen. Het gaat hier in dit geval over onvoorziene ongelukken. Echter er overlijdt echter niemand in Nederland door instortende woningen.¹¹⁰

De geïnduceerde aardbevingen, worden veroorzaakt door een mijnbouw exploitatiebedrijf. Dat de sterkte van de bevingen kan beïnvloeden. Het gaat hier dus niet over onvoorziens risico, maar over bewust schade toebrengen aan de bevolking en hun eigendommen. In dit geval zou de risicofactor eerder 10^{-6} moeten zijn, gelijk aan doorbraak van zeedijken, of nog lager.

RVS (Rapid Visual Screening)

¹¹⁰ Uit de risicoberekeningen over de toegenomen bouwactiviteit en verkeersbewegingen van de versterkingen in de hele provincie, zouden door de bouwmethoden en de verkeersdrukke wel een paar doden per jaar kunnen vallen. Het aantal doden in het verkeer is ruim 600 per jaar of een risicofactor op de hele bevolking van 1: 30.000 dus nog aanzienlijk hoger dan 10^{-5} als gesteld wordt dat iedereen aan het verkeer deelneemt. Met maatregelen probeert met het risico van de verkeersdeelnemers te beperken tot 10^{-5} .

Dit inspectiesysteem voor gebouwen is gebaseerd op het Amerikaanse model (ATC-20) voor een snelle onderzoeksmethode vanaf de openbare weg. Dit onderzoek wordt gebruikt om te beoordelen of een gebouw of elementen aan een gebouw een hoog risico vormen voor de bewoners of de omgeving. Deze methode werd overgenomen om in de provincie Groningen de eerste gebouwinspecties uit te voeren. Na het constateren van een mogelijke gevaarlijke situatie (e.g. lage ratio van muurpenanten) wordt een vervolgonderzoek ingesteld. Dit vervolgonderzoek heet volgens de Amerikaanse methode EVS, *extended visual screening*.

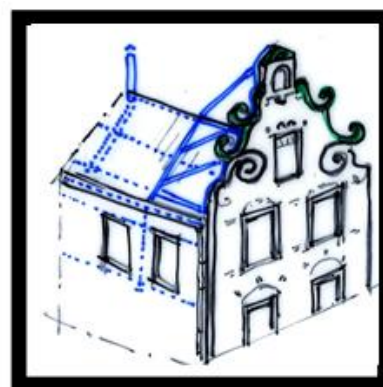
Figuur 1-89. Een hoge schoorsteen of losstaande topgevels zijn hoog risico.

Deze hoog risicovolle elementen en zijn eenvoudig van buitenaf te detecteren met een RVS. De jaren '30 schoorstenen zijn hiervan een extreem voorbeeld. Aan de basis is het metselwerk ook nog onderbroken door de loodslabbe. Versterken is zeer kostbaar en verwijderen of vervangen met een lichtgewicht model zijn dan de opties. Open haarden zijn in energiezuinige gebouwen of voor het milieu niet gewenst (slecht rendement en veel fijnstof uitstoot). Het heeft daarom de voorkeur om de gemetselde schoorsteen in haar geheel te verwijderen, tenzij het een belangrijk architectuur element is.



Figuren 1-90 Voorbeeld van een topgevel.

Dit is meestal een hoogrisico element vanwege gebrek aan verbinding met het dak en sterke erosie van het metselwerk. In dit geval moet de top moet gerestaureerd en goed aan het dak verbonden worden.



Schade en scheuren

Bij de beoordeling van gebouwschade in Groningen wordt de locatie van de scheur in de muren en de scheurafmeting opgenomen. Lichte scheur $\leq 0,3$ mm is zelden zichtbaar op foto's, tenzij in een witgepleisterde muur. Middelmatische scheuren van 0,3 tot 3 mm zijn het meeste waargenomen. **Lichte scheuren en middelmatische scheuren hebben geen structurele consequenties voor de gebouwsterkte.** Zware scheuren van > 3 mm lopen vaak ver door en kunnen gepaard gaan met verschuivingen in de muur; dit percentage is erg laag, maar wel goed zichtbaar, en kan structurele consequenties hebben.

Het bovenstaande is de seismische of bouwkundige benadering van scheuren. De emotionele of architectonische benadering is geheel anders. In Groningen werd door officiële instanties steeds verteld dat de bevingen heel veel sterker zouden worden. Daarom waren de scheuren voor de woningeigenaren een voorbode voor het instorten van het gebouw en dodelijke slachtoffers. Het seismisch versterken van de beschadigde gebouwen had voor de bewoners van die gebouwen daarom een hoge prioriteit.

Voor gebouwen van tussen 1920 en 1940 en gebouwen (jaren '30 woningen) van ná 1970 komen nauwelijks zware scheuren voor bij een $PGAg > 0,1$. Van gebouwen van vóór 1970 komen relatief veel middelmatische schades voor aan de buitengevels (goedkopen snelle bouw). Bij woningen van ná 1970, zoals twee-onder-een-kap woningen, komen er relatief veel middelmatische schades voor aan

binnenmuren door de stijve bouwmethode en balkfundering (meer trilling overdracht). Gebouwen die 'op staal' zijn gebouwd (meestal van vóór 1940) hebben veel middelmatige scheuren, vooral in de fundering vanwege zettingen.

Figuur 1-91. Scheur bij de oplegging/aansluiting van een latei. De latei is over een korte afstand (een strek) op de binnenmuur opgelegd en schuift af. De meeste scheuren rondom raam- en deuropeningen zijn gebouw-gebonden en de oorzaak van matige constructie details (voor seismisch resistente bouw), vaak gecombineerd met lichte zettingen in de fundering. Door trillingen van verkeer of een aardbeving kunnen ze erger worden.



De drie hoofdoorzaken van de scheuren zijn:

- (1) Gebouw gebonden oorzaken (constructie, thermisch, bouwfout) en zettingen in fundering;
- (2) Aardbevingen, waarbij deze vaak resulteren in zettingen van funderingen.
- (3) Aardbevingen met gebrek aan sterkte in de twee horizontale richtingen en gebrek aan verbindingen tussen vloeren en de muren en gebrek aan vloerdiafragma's.

Schade vanwege bestaande zettingen kunnen worden verergerd door alle aardbevingstrillingen, waardoor bestaande spanningen in het metselwerk overschreden worden en tot middelmatige scheurvorming kunnen leiden. Voor minder dan 75% van de schades kon meestal duidelijk worden vastgesteld wat de oorzaak was. In het merendeel van de schadegevallen is er sprake van een combinatie van factoren zoals fundering 'op staal', ongelijke funderingsdiepte, bouwperiode, ouderdom, zettingen in veen of klei en bouwfouten. Het bestuderen van de fundering van een gebouw en de grondslag kan veel informatie verschaffen over de oorzaak van de schade. Het analyseren van de fundering is geen reguliere activiteit bij een RVS.

Voordat de grootste aardbeving van 16 augustus 2012 in Huizinge kwam, waren er al 1100 schadegevallen vergoed¹¹¹. Vanwege de onbekendheid met de kwaliteit en sterkte van de Groningse woningbouw in relatie tot de geïnduceerde aardbevingen werden hierna veel verschillende onderzoeken gestart om hier duidelijkheid in te brengen. Uiteindelijk werd er pas in 2017 een trilling richtlijn¹¹² opgesteld die aangeeft dat nieuwe gebouwen lichte trillingen onder een bepaald niveau moeten kunnen weerstaan.

Schaliegas

Schaliegas¹¹³ is aardgas dat zit opgesloten in leisteen. Een ander woord voor leisteen is "schalie" en heeft een weinig doorlatende structuur. De methode om schaliegas te winnen is daarom anders dan bij het aardgas in Groningen. Voor het winnen van schaliegas (of olie) wordt gebruik gemaakt van *fracking*. Hierbij wordt onder hogedruk chemicaliën en zand tussen de schalielagen geperst en een vorm van porositeit gecreëerd, waarna het gas of de olie opgepompt kan worden. Uit het opgepompte mengsel moet dan de olie of het gas gewonnen worden.

¹¹¹ Deze reparaties waren vrij simpel, maar waren na elke aardbeving opnieuw nodig. Vanwege het plotselinge grote tekort aan vakmensen werden de kosten voor herstel gedurende 2012 en 2013 verveelvoudigd.

¹¹² <https://www.building.nl/uploads/fckconnector/bbb3c9ac-bf69-4a11-ad06-95a88aeca916/3016759984>

¹¹³ Bron tekst en kaartje: <http://aardgas-in-nederland.nl/de-toekomst-van-aardgas/aardgasreserves-en-verbruik/#3a>

Figuur 1-92. TNO-kaartje 2012 van mogelijke schaliegas gebieden.

Hier wordt de fracking technologie gebruikt door horizontaal door de lagen te boren en zand en chemicaliën in te spuiten. In Nederland is er aandacht voor twee schaliegesteente formaties op 2 tot 4,5 km diepte (TNO, 2012). In verband met de aardbevingsschade in Groningen en mogelijk risico voor de kwaliteit van het grondwater, is er veel burgerlijke en politieke weerstand om het schaliegas te gaan winnen in de op het kaartje aangegeven blauwe zone¹¹⁴.



Scheurvorming

Over scheurvorming in de Nederlandse woningbouw zijn uitgebreide rapporten geschreven. E.g. Phd rapport Ilse de Vent, <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:e9a3a2f9-16b5-4b22-a1f4-6511f3543f6e/datastream/Obj/download> *Structural Damage in Masonry*.

In de verdere hoofdstukken van dit boek worden hoofdzakelijk de scheurvorming ten gevolge van de aardbevingen behandeld¹¹⁵. Scheurvorming kan ontstaan en verergerd t.g.v. de aardbevingen.

Secundaire seismische gebouw onderdelen

Dit zijn onderdelen die niet beschouwd worden als deel van het systeem dat weerstand biedt aan de seismische belastingen {Eurocode 8: 1.4.2.14}. Bij bezwijken mogen deze onderdelen geen schade berokkenen aan de draagconstructie of vallen zodat personen getroffen kunnen worden. Bij een RVS dienen deze te worden geïdentificeerd en mogelijke problemen verholpen. Bij een oude woning is van buiten niet te zien of de balken wel aan de muren zitten of een diafragma vormen. Ook kan men niet van buiten zien hoe een schoorsteen dragend is. Bij het onderzoek van de lagere scholen werden regelmatig de verlaagde plafonds opengemaakt om te kunnen bestuderen hoe de spanten aan de muren waren verbonden.

Bij veel bouwcodes moeten de verbindingen tussen primaire en secundaire seismische onderdelen aan extreem hoge sterkte eisen voldoen. Een voorbeeld zijn de bevestigingen van betonnen gevel- of balkonplaten. Echter, het is in een aardbevingszone meer praktisch wanneer deze verbindingen ductiel (taai) zijn bevestigd in plaats van extra sterk stijf verbonden.

¹¹⁴ Dit heeft te maken met negatieve verhalen uit de USA waar het schaliegas oppervlakkiger wordt gewonnen.

¹¹⁵ De SBR, Stichting Bouw Research heeft twee documenten "Scheurvorming in gemetselde wanden, 1976" en "Scheuren in woningen 1969" uitgebracht. Zie ook 2017 onderzoekrapport Witteveen en Bos over NAM scheuren: https://www.nam.nl/nieuws/2017/nam-zoekt-oplossing-deel-schades-zuidlaren/jcr_content/par/textimage.stream/1510311678487/efc5414fe61f9117ea8445fbc94c8a8fcbf0a76/rapid-bijlage-verzamelen-van-informatie-ii.pdf

Figuur 1-93. Invulmuren zijn secundaire gebouwoonderdelen (niet dragende muren).

Deze secundaire gebouw elementen kunnen tijdens een aardbeving wel bijgedragen aan een ondersteuning van een kolommenconstructies (primaire draagconstructie van het gebouw) zodat deze in hun beweging gedempt worden.

In dit hoge flatgebouw (Kathmandu) droegen de bakstenen invulmuren bij aan de demping van de horizontale gebouwbewegingen, waardoor de kolommen in hun maximale momentzones minder vervorming ondergingen. Secundaire gebouwelementen kunnen daarom wel bijdragen aan de bouwsterkte na de vervorming van de primaire elementen.

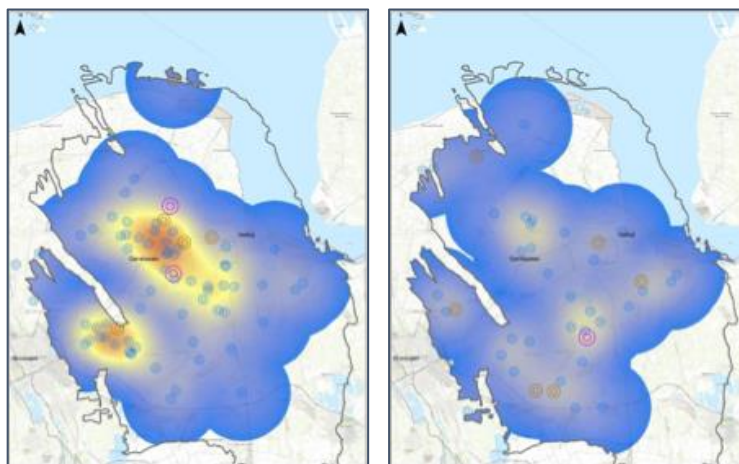


Seismiciteit

De seismiciteit is een maat voor het optreden in de tijd van aardbevingen van een bepaalde sterkte voor een bepaald gebied. De mate van het bewegen van de grondlagen. De oppervlakte seismiciteit wordt meestal in de vorm van een contourenkaart weergegeven, zodat je kunt zien wat voor maximaal risico je op een bepaalde plek van het aardoppervlak kunt verwachten. De diepte seismiciteit geeft aan wat voor bewegingen er in het hypocentrum verwacht kunnen worden. De seismiciteit kan op verschillende manieren worden weergegeven¹¹⁶.

Figuur 1-94. Seismiciteit 2013-2014 in Groningen regio.

Links: maart 2013-2014. Grote en dubbele cirkels zijn grote schokken; kleine cirkels zijn kleine schokken. Oranje geeft een grotere dichtheid aan van de schokken per km²/jaar, en geel een iets lagere dichtheid per km²/jr. In het centrumgebied rond gemeente Loppersum was in 2014 de gasextractie minder, waardoor er minder seismiciteit ontstond. Rechts: maart 2015-2016.



Seismische golven

Door een aardbeving ontstaan verschillende soorten trillingen die zich vanuit de haard van de beving uitspreiden. De verticale P (*pressure*) of drukgolven zijn het snelste (ongeveer 3 km/sec. in Groningen), en de horizontale S (*secundaire*) golven half zo snel. Deze S golven worden horizontaal in twee richtingen gemeten (radiaal en zigzag). Deze trilling-golven planten zich zowel dwars door de aarde als langs het aardoppervlak voort. Op het seismogram worden deze pulsen geregistreerd en kan de sterkte en frequentie worden afgelezen. Dergelijke pulsen worden door seismologen seismische fases genoemd. Vooral het verschil in snelheid waarmee de diverse golven zich voortplanten is van belang.

¹¹⁶ Zie rapport: Apr 13, 2017 - Bijlage 1. Technische bijlage. Advies Groningen gasveld n.a.v. Rapportage recente aardbeving. Wirdum en Garsthuizen 2016/2017. Staatstoezicht op de Mijnen.

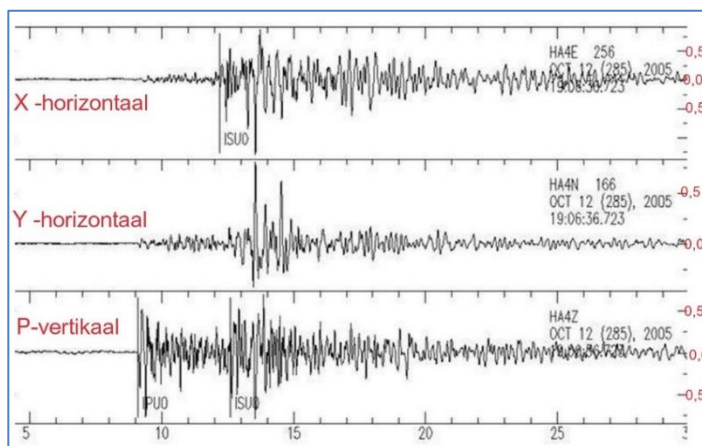
De golfsnelheid wordt bepaald door de combinatie van de elastische eigenschappen en de dichtheid van het gesteente of de grondlagen waarin de golf zich voortplant. In de bovenste grondlagen van de provincie Groningen zitten veel zachte en weke zones. Op veel plaatsen is de bovenste 10 m erg zacht van structuur (klei, veen), waardoor de golven vertragen.

Figuur1-95. Drie soorten seismische golven. Dit is de oppervlakte seismograaf met de registratie van de 2012 Huizinge beving. Uit de grafiek kan gezien worden dat P-verticaal het eerste bij het aardoppervlak kwam. Deze had een maximale amplitude van 0,6. Ook is te zien dat er tenminste twee schokken waren.

De twee horizontale bevingen hebben een grotere amplitude van 0,85 verticale en zijn het meest belastend voor het gebouw.

De $V_{s,30}$ snelheid heeft betrekking op de

bovenste 30 meter en is medebepalend voor de belasting op een gebouw. Hoewel de voortplantingssnelheid P in graniet wel 6 km/sec. is, is deze P in de grondlagen boven het Groningse zandsteen gemiddeld 3 km/sec. De voortplantingssnelheid in de zachte Groningse $V_{s,30}$ toplaag ligt slechts tussen de 100 m/sec. en 200 m/sec.



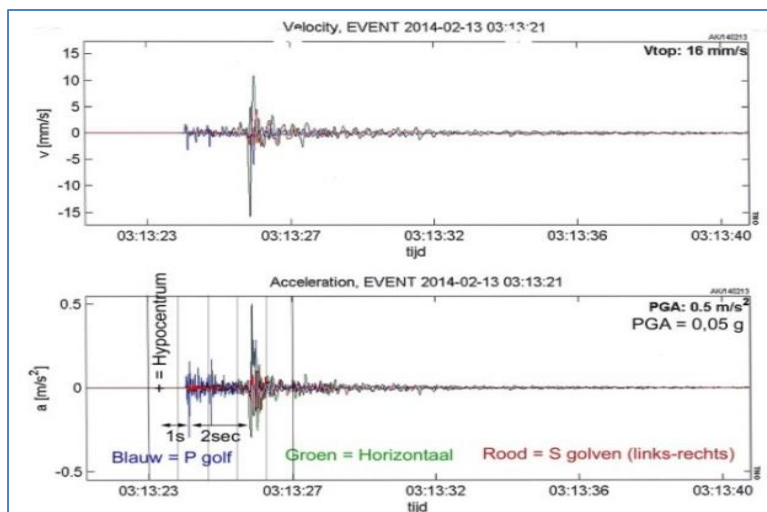
Seismograaf of seismometer

Een seismometer of seismograaf is een instrument om de trillingen van de aarde te registreren. Het bestaat meestal uit een set van drie seismometers: een voor de verticale beweging (Z of V) en twee voor de horizontale bewegingen (X en Y) vanuit het epicentrum. De meter voor de verticale beweging bestaat uit een gewicht dat aan een veer is opgehangen. De meter voor de horizontale is een slinger. Na een beweging zal de massa weer terugkeren in zijn oorspronkelijke evenwichtsstand. De meter wordt elektronisch afgelezen en het signaal doorgestuurd naar een centraal punt voor de analyse.

Figuur 1-96. De twee seismogrammen geven de drie bewegingen aan met de snelheid (boven) en de acceleratie (onder).

Deze schok startte op seconde 23 en kwam aan het aardoppervlak in seconde 26,5 en duurde minder dan een halve seconde.

Het gebouw zal afhankelijk van haar constructie dan nog natrillen.

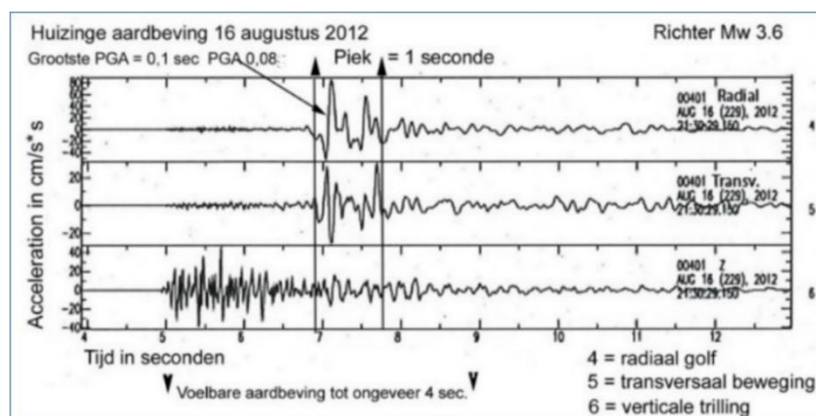


Seismogram

Een seismogram is een geregistreerd resultaat van een seismisch onderzoek door middel van het opwekken van trillingen in de ondergrond. Er worden drie bewegingen geregistreerd. De verticale trillingen (druk of P-golven), de horizontale radiale golven (vanuit het epicentrum naar buiten), en de horizontale transversale S-golven (heen-en-weer beweging vanuit het epicentrum). Op basis van de radiale golven wordt de PGA bepaald. Bij sommige aardbevingen worden zowel de verticale als de horizontale PGA opgegeven. De horizontale PGA veroorzaakt de bepalende gebouwbelasting.

Door de combinatie van verschillende seismogrammen en de tijlijn kan de herkomst van de golven, de seismische bron of aardbevingshaard bepaald worden. Haarden (hypocentra) van door gaswinning veroorzaakte aardbevingen liggen in Noord-Nederland op ongeveer 3 km diepte. Ze staan bijna altijd in direct verband met de breukvlakken in dat reservoirgesteente.

Figuur 1-96. De horizontale radiale beving bepaald de PGA. Op seconde 7,2 met PGAg 0,05 naar het epicentrum en PGAg 0,08 vanuit het epicentrum zijn de hoogste versnellingen. De links-rechts bevingen waren met een PGAg 0,025 aanzienlijk minder.



Sterk Constructief Glaspaneel

Muren met grote raampartijen en smalle penanten zijn seismisch zwakke constructies. Door de raam- en deuropeningen in te vullen met metselwerk zullen de muren (in het vlak van de muur) versterkt worden. De sterkte kan ook verbeterd worden door sterke raamkozijnen of kozijn randen te maken; afbeelding midden onder. Bij historische gebouwen zijn dit vaak voor monumentenzorg nog geen acceptabele oplossingen¹¹⁷.

Door geharde (getemperde), gelamineerde (dubbele) isolatie glaspanelen in de kozijnen te plaatsen en die drukvast vast te zetten en te verlijmen, worden de muurpenaten breder en daardoor wordt de sterkte van het gebouw in het vlak van de gevel groter.



Figuren 1-97. Zwakke gevels kunnen versterkt door sterke glaspanelen.

Links. Dichtzetten van een raam versterkt de hele gevel.

Midden. Sterke kozijn omlijstingen.

Rechtsboven. Sterke glaspanelen in de lichtgroene kozijnen.

Rechtsonder. De markthal te Rotterdam is een voorbeeld met een sterke gevel van gelamineerde glaspanelen. (foto M. Eekhout, Octatube)



¹¹⁷ Het gebrek aan kennis omtrent deze methode en het gebrek aan voorbeeld woningen in de provincie Groningen waar deze methode is toegepast, is hier de oorzaak van de terughoudendheid.

Door bij zwakke gebouwen met steensmuren sterke glaspanelen strak in de kozijnen te plaatsen en te zorgen dat de plafond-zoldervloer diafragma's de muren verbinden, wordt een seismisch sterke constructie gemaakt. De bovenzijde van de muren moeten aan het vloerdiafragma verankerd zijn om de belastingen over te dragen naar het vlak van de zijmuren.

Bij spouwmuren moet het kozijn de krachten overdragen op beide bladen van de spouwmuren. Meervoudig gelamineerde glaspanelen worden in grote projecten gebruikt en is geen onbekende techniek. Echter, als verbetering van de ratio bij zwakke muren met grote raamopeningen en smalle penanten is het onbekend. Onder andere moet worden uitgezocht wat de beste methode is voor thermisch isoleren van de sterke glas panelen. De binnenste ruiten van de gelamineerde glaspanelen kunnen bijvoorbeeld een Low-E coating hebben.

De toepassing bij monumenten zal het een zeer grote kostenbesparing opleveren en geen aantasting van de verdere architectuur van de gebouwen.

Stutten en steigers

Het tijdelijk ondersteunen van een flink beschadigde gebouw onderdelen als noodmaatregel en ter voorkoming van verdere gebouwschade of instorten van dat gebouwonderdeel.



Figuren 1-98. Verschillende methoden van stutten worden toegepast.

Links. Steigers en stempel buiten en in de raamopeningen.

Rechtsboven. De slecht gefundeerde zijmuren van de grote schuren verzakten en werden naar buiten gedrukt.

Rechts. Vanwege de publiciteit door deze stutten werd er veel aandacht aan de gebouwen met stutten besteed.



Het stutten is een tijdelijke, veiligheidsmaatregel in afwachting tot herstel of versterkingsmaatregel of sloop. Het stutten van een constructie betekent niet direct dat de oorzaak van een verzakking of schade direct te wijten is aan een aardbeving. In sommige gevallen is er sprake van bouwfouten en zelfs 'eigen gebrek'. Er bestond geen financiering voor de woningeigenaren om eigen gebrek of bouwfouten te herstellen, of funderingen te versterken, daarom bleven de stutten lang staan.

In veel situaties blijken bakstenen gebouwen die vóór 1980 zijn gebouwd, volgens de toen geldende bouwnormen, niet bestand tegen de schokken (PGA 0,06 tot 0,08) en lopen lichte schade op. Rijtjeswoningen van het type doorzon, met zware betonnen vloeren en in stapelbouw uitgevoerd lopen een verhoogd schaderisico.

Woningen met hoge ramen, smalle penanten en houten vloeren die geen diafragma vormen uit de bouwperiode van vóór 1900 zijn eveneens erg zwak. Bij schadegevallen moesten veel van deze oude gebouwen eerst gestut en daarna versterkt worden wanneer de aardbevingen in frequentie en sterkte zouden gaan toenemen van $PGA_g < 0,1$ tot $PGA_g \geq 0,15$.

Terugkeertijd (herhalingstijd)

Return period. {Eurocode 8: 1.4.2.4} De herhalingstijd is een maat voor de kans op een extreme of maximale gebeurtenis zoals de waterstand of de Piekgrondversnelling (PGA). In de Home Webtool werden vier opties voor herhalingstijd gegeven; 95 jaar, 475 jaar, 975 jaar en 2475 jaar. De standaard herhalingstijd van het NPR9998 is 475 jaar. Een nogal theoretische wiskundige waarde (gebaseerd op tektonische principes)¹¹⁸. In de huidige Home Webtool zijn de herhalingstijden 50 en 90 jaar, omdat de gasexploitatie binnenkort afloopt.

Als bij een herhalingstijd van 475 jaar, de $a_g S$ (PGA_g inclusief de grondfactor) kleiner is dan $PGA_g 0,05$ behoeft geen sterktebeoordeling op aardbevingsbelastingen plaats te vinden. Seismisch gesproken hoeft er dan niets versterkt te worden. In de situatie van Groningen zal er over de komende periode van 20 jaar heel weinig of geen aardgas meer uit het centrale gasveld gewonnen worden, waarna de bevingsterkte en frequentie tot bijna nul daalt.

Wanneer er wel weer gas uit het Groningse veld wordt gewonnen zal de NAM moeten zorgen dat de bevingen niet boven de $PGA_g 0,03$ uitkomen, zodat er geen schade meer optreedt. Dat kan alleen als men niet alle winningslocaties sluit, maar van elke winningslocatie een enkel put actief laat zijn en een slechts beperkte hoeveelheid gas onttrekt.

Testen in Italië

In 2012 was er weinig Nederlandse informatie over de voortplanting van de trillingen in de Groningse grondlagen en nog minder informatie bij de niet-bouwkundige ingenieurs over het gedrag van de ongewapende gemetselde gebouwen in Nederland. Om meer kennis op te doen werden speciale testprogramma's opgezet over de diepe en ondiepe ondergrond, maar ook over bouwmethoden en materialen.

In Italië werd bijvoorbeeld een typische rijtjeswoning nagebouwd, op basis waarvan de verschillende rekenmethoden gekalibreerd konden worden. In door de NAM aangekochte testwoningen werden versterkingsmethoden uitgetest op praktische toepasbaarheid en kostenaspecten, terwijl door de TU-Delft ook metselwerktesten werden uitgevoerd. Door de NAM zijn sinds het groter worden van de aardbevingen in 2006 veel verschillende soorten onderzoeken en testen opgezet. Een onderdeel is de installaties van veel gebouwsensoren op gebouwen en trilling-meters in de diepe ondergrond.



Figuren 1-99. Testprogramma's in Italië en Nederland werden uitgevoerd.

¹¹⁸ In werkelijkheid zou men voor geïnduceerde aardbevingen een aangepaste herhalingstijd kunnen toepassen, waarbij enigszins rekening gehouden wordt met een lichte nawerking van de zettingen.

Boven links: Een testwoning (nagebouwde rijtjeswoning) werd in Italië op een tritafel nagebouwd en aan series testen onderworpen.

Rechtsboven: Voorbeeld van een vloerversterking of diafragma vorming, door de toepassing van Carbon Fibre stroken.

Rechts. De typische lage arbeiderswoning In testwoningen in de provincie Groningen werden seismische versterkingen aangebracht als praktijktest. Door deze praktijkervaringen werd duidelijk in hoeverre deze maatregelen praktisch uitvoerbaar waren.



Het type lage arbeiderswoning is een in Groningen veel voorkomende gebouwworm met een indeling die hoogst onrendabel is om seismisch te versterken en thermisch te isoleren.

Testwoningen

In de provincie Groningen zijn onder het aardbevingsproject een dozijn woningen¹¹⁹ van verschillende bouw typologieën aangekocht om nader te kunnen bestuderen en om testen in uit te voeren. Deze woningen werden gestript om de kwaliteit van de muren te kunnen beoordelen.

Figuren 1-100. Voorbeelden van testwoningen.

Bij het onderzoeken van de testwoningen werd duidelijk dat sommige muurdelen waarschijnlijk zwakker waren dan de standaard berekeningen. Voegwerk is vaak aan de binnenzijde niet uitgevuld en in de loop van tijd zijn er soms verschillende gevel aanpassingen geweest.



¹¹⁹ Omdat de precieze sterkte van de oudere woningbouw in de provincie niet bekend was (wel de algemene waarden), en omdat men vroeger vaak op basis van ervaring bouwde, of de lokale aannemer bouwde zoals de burens bouwden, werden er veel testen opgezet. Het vermeende gebrek aan detailkennis resulteerde in een aantal onderzoeken zoals het bepalen van de sterkte van metselwerk. Stukken metselwerk werden uit muren gezaagd en in een laboratorium van de TU-Delft getest. Die uitkomsten kwamen overeen met wat men in de bouwwereld al lang wist en al 50 jaar geleden in mijn polytechnisch zakboekje stond.

Figuur 1-101. Verschillende soorten testwoningen.
Boven links. Oude boerenwoning.
Rechtsboven. Rijtjeswoning jaren '70.
Rechts. Een van de nieuwere testwoningen. In deze rechtse woning werd onder andere de verbinding van het vloerdiafragma aan de buitenschil versterkt met een experimentele nieuwe verbindingmethode.
De testwoningen gaven inzicht in de praktijk van de toepassing van de versterkingsmaatregel en waren ook een voorlichting- en trainingslocatie voor ontwerpers en ondernemers.



In een deze testwoningen werden al bekende vormen van seismische versterkingen aangebracht en methoden die voorgesteld waren in de design competitie uit 2014. De versterking van wanden en verbeterde verbindingen tussen vloeren en muren (diafragma's). Dit werd gedaan om de technische en economische haalbaarheid van de verschillende constructietechnieken te testen en de kosten van het aanbrengen te evalueren. De testwoningen werden ook gebruikt om voorlichting te geven aan aannemers en bewoners over de mogelijke opties van versterken met hun voor- en nadelen.

De testwoningen werden alleen gebruikt voor het verbeteren van de gebouwsterkte, maar niet voor het verduurzamen van het gebouw zoals herindeling gebruiksruimten of goede isolatie. De eerste testwoningen werden versterkt tegen een zeer hoge PGAg 0,36 in plaats van Mmax met PGAg 0,2. De uitgebreide gebouwversterkingen inclusief enkele *Base-isolation* projecten werden ondernomen om te bestuderen in welke mate de zware gebouwversterking voor oude gebouwen mogelijk was.



Figuren 1-102. Platform fundering en zware stalen metalen portalen.
Boven en rechts. In enkele (test)woningen werd in 2014 een volledige platformfundering en extra zware binnen- en buitenmuur versterkingen en diafragma's toegepast om een PGAg 0,36 te weerstaan volgens de NPR-2015. Deze integrale versterkingsoperaties bij oude gebouwen kostten meestal meer dan tweemaal de waarde van de woning.



Tilt-meter

Bewegingen van een gebouw zoals gedeeltelijke verzakkingen kunnen met een tilt-meter zeer nauwkeurig worden geregistreerd¹²⁰. Deze meters worden veelvuldig gebruikt bij de aanleg van tunnels zoals bijvoorbeeld de metro. Hierdoor kan worden waargenomen of een gebouw scheefzakt. Voor een verzakking door een aardbeving is dit ook mogelijk als er vóór en ná de beving wordt gemeten. Echter, voor de aanvang van de grotere trillingen (2000) waren ze niet geïnstalleerd.

De trilling-meters moeten bij elke trilling het driedimensionale signaal versturen. In het geval van geïnduceerde aardbevingen moest dit signaal een frequentie van minimaal 500 Hz kunnen verwerken. Tilt-meters waren in 2014 hiervoor niet geschikt. Sinds 2017 zijn er een aantal tilt-meters geplaatst, om bewegingen over de tijd van gebouwen of dijken goed in kaart te kunnen brengen.

Triggerwerking

De ene aardbeving kan een andere doen starten, omdat er dan naast de ontspannen zone (waar de beving plaats vond) een nieuw spanningsverschil ontstaat. Bij de 16 augustus 2012 beving in Huizinge waren er twee of drie bevingen, direct na elkaar, de eerste veroorzaakte kennelijk een tweede. Zie de grafieken bij 'Seismograaf'. Dit was bijvoorbeeld de reden waarom die aardbeving van 16 augustus 2012 in Huizinge (Richter 3,6) veel sterker werd gevoeld (door sommigen wel 10 seconden) dan een eerdere, bijna even grote beving op 8 augustus 2006 in Middelstum met een Richter 3,5 die maar een seconde werd gevoeld. De gevoelde tijd is dan inclusief het natrillen van het gebouw zelf.

Vanwege verzakkingen en zettingen van funderingen zullen elastische spanningen in muren ontstaan. Die opgebouwde spanningen kunnen bij extra trillingen of bevingen toch in scheurschade resulteren. De aardbeving is dan de trigger. De dan in de muur zichtbaar geworden scheur wordt geclaimd als aardbevingsschade, terwijl in feite de eerder opgebouwde spanning in de muur de hoofdoorzaak kan zijn geweest. Het is ook mogelijk dat door de vele kleine niet-voelbare trillingen sinds 1970, die door de gasexploitatie werden gegenereerd, de zettingen van funderingen hebben versneld.

Figuur 1-103. Scheuren kunnen ontstaan na een trigger door een beving.

Oude gebouwen 'op staal' en zonder lateiconstructie hebben vaak spanningen in het metselwerk vanwege zettingen, die bij extra trillingen kunnen vergroten of zich ontladen in zichtbare scheuren.

Zijwaartse druk van een toog in combinatie met weinig boven belasting op de penanten kunnen verwijding van die penanten teweegbrengen.



Trilling-meter, seismometer

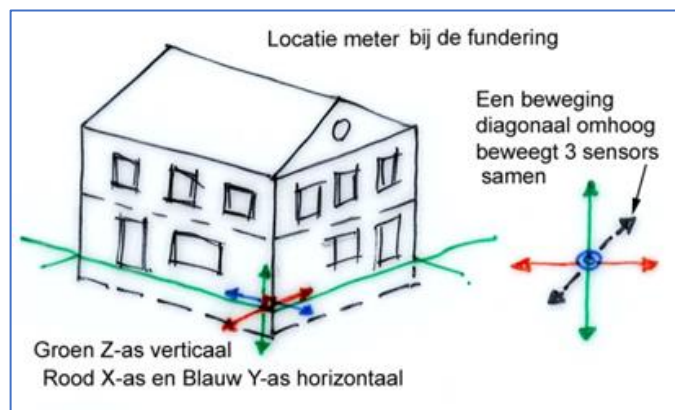
Ook seismometer. Een trilling- of versnellingsmeter is een elektronisch meetapparaat dat een versnelling kan registreren en meten.

¹²⁰ Zie voor verdere uitleg <https://en.wikipedia.org/wiki/Tiltmeter>

Het wordt onder andere gebruikt in de seismologie om de trillingen van de aarde in het gebied dicht bij het epicentrum te meten. De elektronische trilling meters geven in drie richtingen de beweging van de grond of het gebouw weer. Horizontaal in de x-richting; horizontaal loodrecht erop in de Y-richting, en verticaal in de Z-richting.

Figuur 1-104. Drie assen van een trilling-meter of seismometer.

Een schuine beweging in een horizontaal vlak geeft een uitslag in de x en y coördinaten. Een schuine beweging naar boven geeft hierdoor een uitslag in alle drie de x, y en z coördinaten. De mate van uitslag wordt ook bepaald door de richting van de aardbeving, de massa en hoogte van het gebouw, de plaats van de trilling-meter en de elastische constructie van het gebouw.



Een trilling-meter die boven in de vrije grond zit zal alleen de pulsen weergeven van de trillingen die de (elastische) ondergrond veroorzaken. Een trilling-meter in een gebouw zal ook de gebouwrespons weergeven en langer natrillen.

De gekleurde grafiek hieronder geeft een trilling weer van een meter die aan een fundering is vast gebouwd. Na de hoge piek (rood) zijn de continuerende kleinere trillingen (blauw) de bewegingen van het gebouw die door de elasticiteit van het gebouw terugkomen naar de fundering (response).

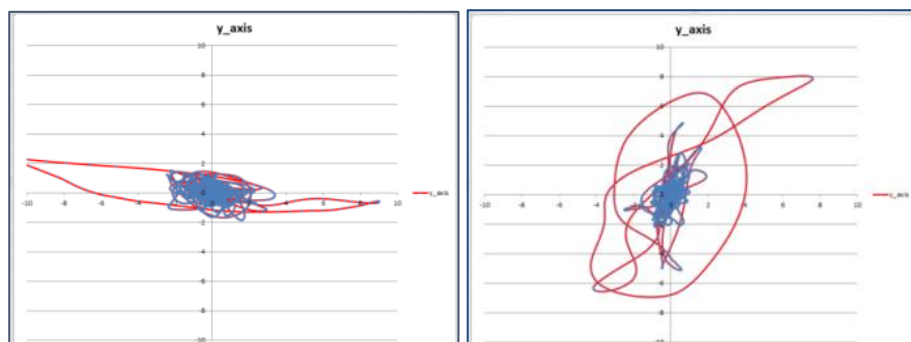
Wanneer er een trilling-meter bovenin een hoog en elastisch gebouw wordt geplaatst, zal deze het lange natrillen of zwiepen van dat hoge gebouw registreren. Trilling-meters in zowel de fundering als bovenin kunnen dan met elkaar vergeleken worden om het elastische gedrag van het gebouw te evalueren.

Figuren 1-105.

Verschillende plaatsing van trilling-meters.

Links: Een enkele heen-en-weer puls van een fundering trilling-meter.

Rechts: een meer complexe beweging van een gebouw dat daardoor ook een andere elastische respons terug naar de fundering geeft.



Een gebouw op betonnen palen, of met aan elkaar verbonden betonnen funderingsbalken zal veel langer natrillen dan een gebouw met 'op staal' gemetselde fundering. Een fundering 'op staal' met scheuren zal de trilling enigszins absorberen. Gebouwen met sterkere funderingen zoals gewapend betonnen plaat-balk constructies kunnen meer schade boven in het gebouw krijgen.

De trillingsfrequentie heeft invloed op het schadeniveau aan een bakstenen gebouw; een lage frequentie (< 10 mm/sec.) heeft vrijwel geen invloed. Een hoge frequentie met een trilling sterkte van > 30 mm/sec. heeft echter een grote invloed op het gebouw en resulteert vaak in schade, in combinatie met andere factoren. De trillingsfrequentie van oppervlakkige geïnduceerde bevingen is vrij hoog.

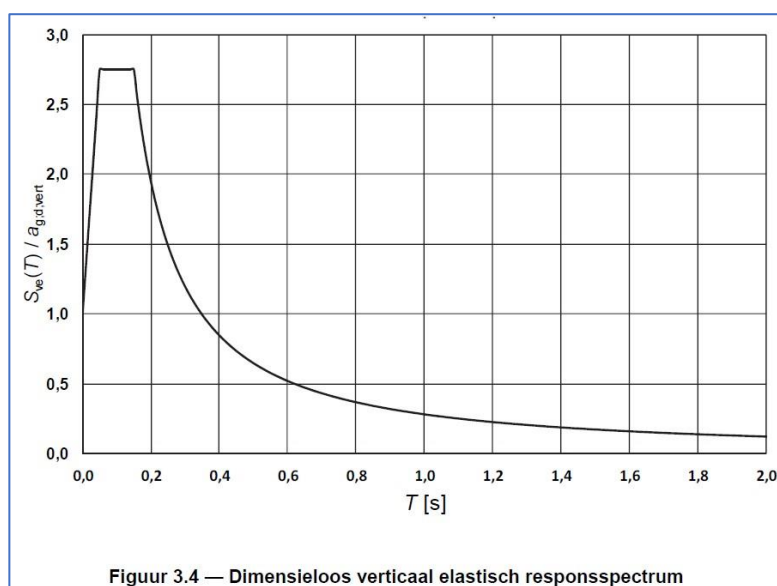
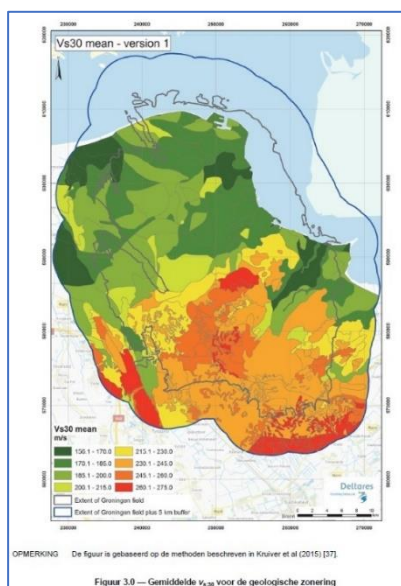
Het natrillen van het gebouw heeft ook effect op de fundering. Bij een te zwakke fundering kan dat weer leiden tot zetting. De interactie is hier complex, vooral bij funderingen op staal en op elastische

grond soorten. De trilling-richtlijn uit 2017 geeft wel een handvat voor wat gebouwen van na 1980 zonder enige schade zouden moeten kunnen doorstaan, maar dat geldt niet de vooroorlogse bouw.

Trilling frequentie

De trilling-frequentie van een gebouw is afhankelijk van de trilling-frequentie van de grond, de stijfheid van het gebouw, de gebouwhoogte en de massa. De trilling-frequentie van de grond in het epicentrum is afhankelijk van het schokpatroon in het hypocentrum en de karakteristieken van de bovenliggende grondlagen en de afstand tot het epicentrum.

Een enkele schok in het hypocentrum vanwege het instorten/verkrumelen van het zandsteen (compactie) wordt via het Zechstein en de bovenliggende aardlagen verspreid naar het epicentrum. De grondsoort bepaalt de frequentie (trillingen per seconde, golfsnelheid) en de lengte van de uitslag in dat epicentrum. Deze worden (V_{30} van de bovenste 30 m grond) zijn in de Webtool van het KNMI uitgerekend. De maximale PGA van een locatie op die Webtool geeft de acceleratiewaarde aan inclusief de V_{30} factor. Vanuit het epicentrum zal de trilling-frequentie langzamer worden, maar zal de horizontale verplaatsing van de grond iets toenemen.



Figuren 1-106. Grondsoorten kaart Groningen en het elastisch responspectrum paragraaf 3.2.2.2.1 van de NPR. Op basis van deze gegevens wordt de maximale PGA voor elke locatie op de KNMI Webtool aangegeven. De T_s factor voor zachte gronden en lage gebouwen is 0,14 en is van toepassing op de gehele provincie.

Volgens de NPR kunnen per gebouw hoogte, massa en elasticiteit gedetailleerde berekeningen gemaakt worden, maar voor lage bakstenen gebouwen betekent de horizontale belasting van een gebouw tijdens een aardbeving van $PGA_g 0,1$ dat 10% van de massa van dat gebouw als horizontale kracht optreedt. Daarbij moet steeds de massa genomen worden boven een horizontaal niveau en de afschuivingskrachten of kanteffecten op dat niveau berekend worden.¹²¹

Voor hoge gebouw onderdelen zoals schoorstenen en geveltoppen is het wel relevant dat de aannemer zich bewust is dat de horizontale verplaatsing van een gebouw onderdeel tweemaal zo groot wordt bij een tweemaal zo grote hoogte.

¹²¹ Dit is een eenvoudige rekenmethode die elke aannemer kan uitvoeren. De meer complexe berekeningen die de NPR aangeeft komen op dezelfde belastingen uit. Gegeven dat men het niveau van de Maximum PGA slechts benadert, is het heel erg gedetailleerd uitrekenen een overbodige activiteit die voor laagbouw onnodig veel tijd en daarom kosten vergt.

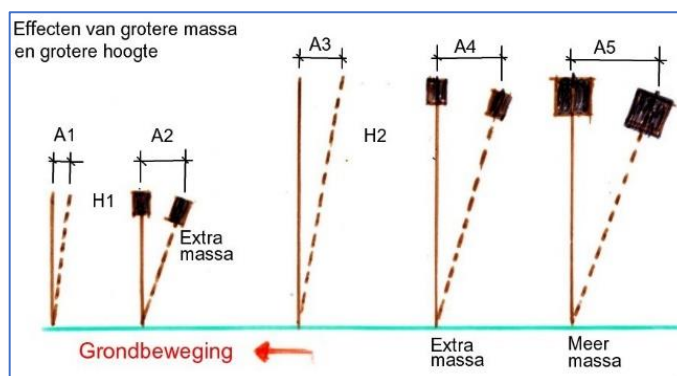
Dat kan betekenen dat bij losstaand metselwerk (op een loodslabbe) of bij onvoldoende bovendruk die als tegenkracht fungeert het kanteffect eerder zal optreden. In principe kan voor traditioneel ongewapend metselwerk niet gerekend worden op enige treksterkte van dat metselwerk.

Figuur 1-107. Het effect van de trilling.

Links: Bij een grotere massa zal de uitslag (A2) van het gebouwonderdeel ook groter worden.

Midden: Gebouw H2 is 2X hoger dan gebouw H1. Bij een hoger gebouw zal de uitslag van de top evenredig groter worden (A3 t.o.v. A1).

Rechts: Bij een gelijke grondbeweging zal bij een grotere massa de horizontale verplaatsing in de top groter zijn ($A4 > A3$ en $A5 > A4$).



Een grotere massa betekent ook dat de trilling-frequentie lager wordt (langzamer). Het eerste effect is dat mensen die zich boven in een gebouw bevinden de bevingen meer zullen voelen dan de mensen op de begane grond. Het tweede effect is dat het gebouw langer zal blijven natrillen afhankelijk van de elasticiteit van het gebouw.¹²² Het gevoel dat de aardbeving langer duurt neemt daarom toe in de hoogte en verwijdering van het epicentrum.

Een stijver gebouw (baksteen) heeft een kortere frequentie dan een flexibel gebouw (hout, staal). Hierdoor zal er bij een korte frequentie (laagbouw Groningen) meer schade ontstaan dan bij hoge gebouwen. Dit is een van de redenen waarom in aardbevingsgebieden ongewapende lage gebouwen vaak veel schade vertonen.

Elk gebouw heeft afhankelijk van de hoogte een eigen frequentie. De aardbeving heeft ook een eigen frequentie. Harde rotsgrond heeft een erg hoge frequente en zachte grond een lagere. Wanneer de twee frequenties van de grondbeving en het gebouw gelijk zijn kan resonantie ontstaan waardoor de horizontale uitslag versterkt wordt. Dan worden de krachten ook versterkt en kan grote schade aan het gebouw ontstaan.¹²³

Het principe van de grotere uitslag bij grotere hoogte en grotere massa is vooral belangrijk bij boven het dak gemetselde schoorstenen en topgevels. Daarbij komt dat de houten dakconstructies meer flexibel zijn dan het stijve metselwerk van de onderliggende etages. Hierdoor is er meer bewegingsmogelijkheid van die schoorstenen en topgevels. Zie hoofdstuk Schoorstenen.

Uitputting gasveld

De uitputting van het gasveld was de doelstelling van het winningsplan 2007 en de eerste, aangepaste versie van het winningsplan 2013. Op basis van de gegevens van de 8-08-2006 en 30-10-2006 aardbevingen te Westeremden werd de aardgasproductie teruggedraaid, waarna er gedurende ongeveer een jaar geen grotere bevingen meer kwamen, en had men in 2007 het idee dat een exploitatieniveau van omstreeks de 45 miljard m³/jaar niet aanzienlijk hogere aardbevingen zou opleveren dan PGAg 0,1 (Richter < 4) en de gebouwschade of herstelkosten te overzien waren.

¹²² Bij bakstenen gebouwen is de elasticiteit heel erg laag en daarom zal er slechts weinig van de aardbevingschok geabsorbeerd worden. Het effect daarvan is dat men in bakstenen woningen een knal hoort (knappen van baksteen), waarna de beving grotendeels voorbij is.

¹²³ Vanwege de korte periode van de geïnduceerde schokken in Groningen zal er geen resonantie mogelijk zijn. Ook het ontstaan van grondverweking of liquefaction is met de zeer korte bevingen in Groningen niet mogelijk.

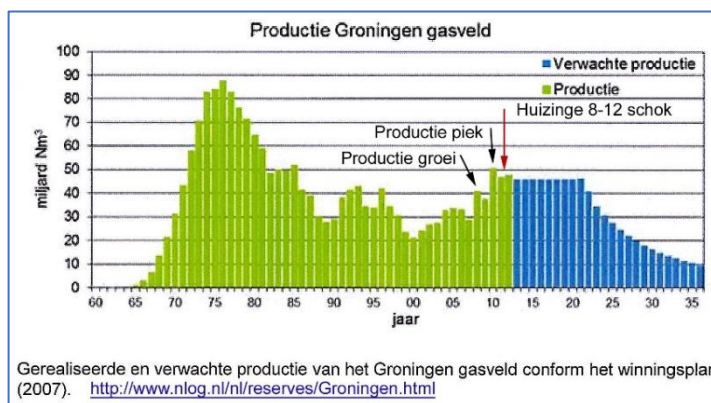
Na de nieuwe aardbevingen in 8-05-2008 (Zeerijp) werd de aardgasproductie opnieuw teruggedraaid en het effect van die laatste aardbeving en de bevingen daarna te evalueren.

Vanwege het gebrek aan doorzetten van grotere aardbevingen na 2006 en 2008 was het risico van een hogere gasproductie na de 2012 Huizinge aardbeving als gering ingeschat.

Figuur 1-108. Het oude winningsplan van 2007.

Hierin wordt de langere termijnplanning van de aardgasproductie aangegeven tot 2040, met een mogelijke uitloop tot 2050 voor de volledige uitputting. Op dat moment is nog ongeveer ¼^{de} van het gasvolume nog niet gewonnen.

Vanaf 2022 zou het door de drukverlaging niet meer mogelijk zijn om op maximale capaciteit te draaien.



Ná 2022 zou de druk in het aardgasreservoir flink gedaald zijn, waardoor de inwendige doorstroming zou verminderen. Met het aantal extractiepunten zou het dan niet mogelijk zijn om op volle capaciteit te produceren. Er moet een plan gemaakt worden om in 2050 de hele productie af te sluiten. Een geleidelijke vermindering vanaf 2022 tot aan de uitputting is dan het resultaat.

Of men in de toekomst toch over zal gaan tot uitputting hangt dus af van de beheersbaarheid van de exploitatie en trillingen (< PGAG 0,04) en of de woningen in de tussentijd voldoende en op de juiste manier gerepareerd of versterkt zijn. Wanneer dat niet is gebeurd kunnen er bij lagere bevingswaarden toch weer oude schades terugkomen. Het hangt ook af van de kennis van de bevolking van Groningen over de toekomstige trillingen en het lage risico wat ze lopen.¹²⁴ Nieuwbouwwoningen hebben sowieso geen las van de trillingen, het gaat dus over de oudere bebouwing of die tijdig versterkt is.

Veengronden

Veen is een grondsoort die voornamelijk bestaat uit gedeeltelijk verteerd plantenmateriaal zoals veenmossen en een vochtgehalte van meer dan 75% heeft. Door belasting van een gebouw zal het veen samendrukken en wordt het water er uitgeperst. Hierdoor ontstaat inklinking, en bij een fundering 'op staal' gebouwverzakking. Veen dat droog komt te staan door bijvoorbeeld het verlagen van het grondwater zal gaan oxideren waardoor het volume verliest, inklinkt en de er boven staande fundering verzakt. Dit zal bij gemetselde gebouwen met zwakke funderingen leiden tot scheurvorming. Verlaging van het grondwater wordt veroorzaakt door droogte en bemaling, Bemaling is nodig wanneer door compactie het maaiveld verzakt en het grondwater dan relatief hoger komt te staan.

Figuur 1-109. Grondsoortenkaart Wageningen Universiteit, 2006. De paarse gebieden zijn veen. Wanneer het water uit het veen wordt onttrokken ontstaat bodemdaling.



¹²⁴ Dit is dus een politieke en economische kwestie. Deze terminologie gaat daar niet verder op in.

Bij bebouwing op veen zijn extra brede funderingen gewenst, of funderingen op palen die op een dieperliggende zandlaag dragen. Oude woningen op veen kunnen vaak het meest economisch op een platformfundering geplaatst worden

Veiliger maken

Alle ingrepen die nodig zijn om op korte termijn de veiligheid van de bewoners te verbeteren of acute veiligheidsproblemen binnenin of buiten in de omgeving van het gebouw weg te nemen.

Dit kan zijn door het stutten van het gebouw, of losse gebouwdelen vast te zetten of te verwijderen. De bewoners van het gebouw kunnen ook uit de woning geplaatst worden.

De term 'veiliger' is een betrekkelijk begrip en voor de bewoners een gevoelsmatige kwestie. Echter, de NPR9998 verstaat onder veilig 'net-niet-instorten', want door instortingen kunnen mensen het slachtoffer worden.

'Veilig' volgens het begrip van de NPR is NIET veilig volgens de bewoners in de provincie.

Of de bewoners in een gebouw zich al-dan-niet veilig voelen is subjectief. Dat veiligheidsgevoel is gerelateerd aan het aantal aardbevingen die ze voelen en horen, het aantal scheuren dat het gebouw vervolgens vertoont, en officiële mededelingen over toekomstige zwaardere aardbevingen. Vooral de onzekerheid over toekomstige grotere aardbevingen, in combinatie met de al ontstane scheuren, geeft de eigenaar-bewoner meestal een erg onveilig gevoel.

Figuur 1-110. Stutwerk rond een ingangspartij van een woning.

Gebrek aan structurele samenhang (vloerdiafragma) en een onregelmatige plattegrond zijn vaak de oorzaken van scheuren. Scheuren in een gebouw maken volgens de NPR nog geen onveilig gebouw, maar wel volgens de bewoner.



Het criteria veiligheid in Nederland is gebaseerd op de norm 10^{-5} , dat wil zeggen dat er niet meer dan 1:100.000 ongelukken per jaar mogen voorkomen. De maatregelen in de bouw voor steigers, ladders, apparaten etc. wordt hier regelmatig op aangepast. Zie ook de beschrijving onder 'Risico'.

De commissie Meijdam geeft aan:¹²⁵

Individueel risico als gevolg van een aardbeving.

De kans dat iemand komt te overlijden door een aardbeving (instorting van een gebouw), in de periode van een jaar. In dit rapport worden vooral gehanteerd de waarden 1 op 100.000 per jaar (10^{-5}).

Deze definitie telt al het aardbevingsrisico dat een persoon loopt bij elkaar op en gaat ervan uit dat een persoon het grootste deel van zijn tijd doorbrengt in gebouwen zoals thuis, op het werk of op school.

Bij het gepland aanbrengen van schade aan gebouwen en persoonlijke bezittingen moet de schade veroorzaker alle kosten vergoeden of de schade volledig tenietdoen door reparaties.

¹²⁵ Eindadvies 'Handelingsperspectief voor Groningen' Adviescommissie Omgaan met risico's van geïnduceerde aardbevingen 14 december 2015. <https://www.parlementairemonitor.nl/9353000/1/i9vvi5epmj1ey0/vk01ksmvtncw>

Dit is van toepassing op geïnduceerde aardbevingen want die zijn niet veroorzaakt door het noodlot. In een dergelijke situatie zou maximaal een risicoprofiel wenselijk zijn van 10^{-6} . Het bepalen van de M_{max} moet dan ook geschieden op basis van de gebouwsterkte en het toelaatbare schadeniveau.

Verduurzamen

Verduurzamen is op vier manieren.

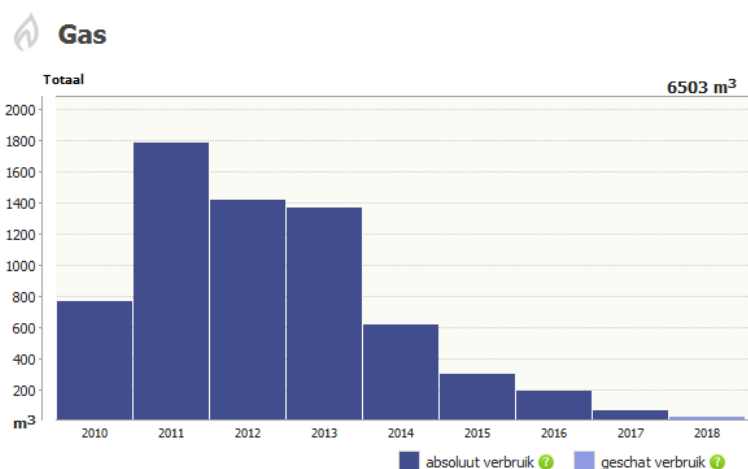
- A. Het gebouw sterker maken of anderzijds aanpassen zodat het langer meegaat en ook voor andere bewoningsvormen of doeleinden gebruikt kan worden. De ruimte indeling, de mogelijkheid voor levensloopbestendige bewoning, of de flexibiliteit zijn hierbij van belang.
- B. Het beter isoleren (a). Dit is in veel documenten de bedoelde mening van verduurzamen. Ook (b) het energie verbruik/opwekking van is toepassing is (BENG). Alleen beter isoleren is niet het complete verhaal.
- C. Het gebruik van duurzame materialen en constructies, die zeer lang standhouden en weinig onderhoud vergen. Zoveel mogelijk materialen recycleren, waarbij de materialen die gebruikt worden van duurzaam geëxploiteerde bronnen zijn zoals duurzaam geproduceerd hout. Ook de materialen voor de aanleg van de infrastructuur rondom het gebouw zijn hierbij van belang. Het maximale hergebruik en recycling van bouwafval is van belang.
- D. Een woonmodel waarbij de duurzame exploitatie en het gebruik van de omgeving ook van belang is (infrastructuur water, riolering, straten, etc.). De realisatie van woongroepen waar gemeenschappelijk gebruik van diensten (niet iedereen een eigen auto, wasmachine en bladblazer) en infrastructuur voorop staat en de bewoners elkaar kunnen ondersteunen in sociale en maatschappelijke voorzieningen.

De component C kan alleen worden gerealiseerd wanneer de verschillende afvalmaterialen gescheiden worden afgevoerd en aangeboden aan bedrijven die deze materialen kunnen (her)gebruiken of opwaarderen, of recycleren. Door op de bouwplaats de verschillende materialen gescheiden te houden is dit mogelijk. Zie ook **Ladder van Lansink**.

Door oude woningen aardbevingsbestendig te maken worden ze primair verduurzaamd volgens A, maar dat is alleen zinvol wanneer die woningen een goede fundering hebben en **nog een paar honderd jaar goed kunnen functioneren**. Wanneer de versterking door de NAM vergoed wordt, zal in de praktijk de eigenaar nog twee investeringen moeten doen in het kader van verduurzamen; B (a) de thermische isolatie en B (b) de eigen energieopwekking via technische installaties.

Figuur 1-111. Daling van het gemiddelde gasverbruik van een vrijstaande kleine woning.

In een aantal woningen werden gedurende 7 jaar verschillende vormen van verduurzaming toegepast (hoofdzakelijk isolatie, inclusief PV), waardoor het gasverbruik substantieel daalde.



Verweking

Liquefaction {Eurocode 8: 1.4.2.19} Verlies van sterkte en stijfheid in van vocht in niet-verdichte, maar verzadigde zandgrond, door trillingen en de daarmee gepaard gaande reductie van effectieve spanning en draagkracht van die grond. Bij gedeeltelijke verweking is er nog een deel van de korrelspanning over (druk op de zandkorrels). Wateroverspanning bestaat uit tijdelijke extra waterspanning in de poriën tussen gronddeeltjes, die kan worden veroorzaakt door snelle schuifspanningswisselingen tijdens een aardbeving. Vanwege de lage PGA, gecombineerd met hele korte trilling perioden en weinig natte zandgronden komt grondverweking in Groningen niet voor. Slechts bij $PGA_g > 0,2$ en lange trilperioden van tientallen seconden is dit mogelijk.

Figuur 1-112. Voorbeeld van verweking van zandgrond waardoor het water omhoogkomt en de draagkracht van de grond kwijtraakt. Langdurige en zware aardbeving in New Zealand 2011.

Omdat de trillingen in Groningen slechts kort zijn, komt verweking hier niet voor, maar wel zetting.



In de bovenste 10 - 15 m van de bodem zijn in Groningen wel zandpakketten te vinden die onder het grondwater zitten en waarop met palen gefundeerd wordt, maar deze zandlagen zijn goed verdicht en geven geen aanleiding tot verweking. Wel is het mogelijk dat paalfunderingen die te hoog belast worden door aardbeving trillingen dieper in de zandlaag doordringen.

Zandsteen

In de hele wereld komen dikke zandsteen formaties voor. Miljoenen jaren voor het ontstaan van dat zandsteen waren grote delen van de aarde bedekt met heel veel planten. De decompositie (rotten) van de gigantische hoeveelheden plantenresten veroorzaakte ook een grote hoeveel uitstoot van methaangassen (CH_4) die in de atmosfeer een zeer hoog-isolerende werking heeft. Het gevolg was een extreme opwarming van de aarde die overal woestijnvorming tot gevolg had en het rondwaaien van dat zand. Deze tientallen en honderden meters dikke zandpakketten die over de rottende planten werden afgezet, werden doorstroomd met het methaangas. Door de opwarming smolten ook de poolkappen en steeg het zeewater niveau wat door de grote hitte steeds verdampte. De zeezout afzettingen blokkeerden de doorstroming van het methaangas zodat dit op sommige plaatsen stopte.

Figuur 1-113. Uluru Rock in Australië steekt meer dan 300 m boven de grond uit en heeft >1 km doorsnede. Dit massief laat zien dat er hier naast porositeit ook grote gaten in het zandsteen kunnen zitten.

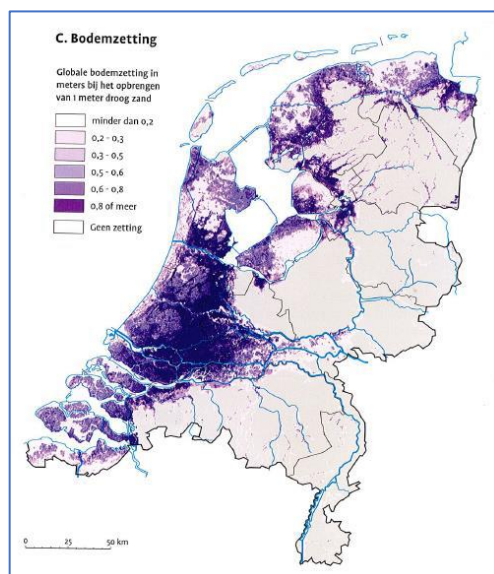


Zetting van grond

Zetting is inklinking van de grond onder fundering door belasting, trillingen, door krimp zoals het geval is bij uitdrogen van veen, en door de bouw van zware kunstwerken zoals dijken, en nog meer oorzaken zoals compactie. Bij het plaatselijk ophogen van de grond of het aanbrengen van enig ander materiaal kan over een aantal jaren zetting geven; het grondwater kan onder deze grondophoging of constructies worden weg geperst, waarbij bijvoorbeeld funderingen die langs het talud zijn aangelegd dan worden vervormd.

Door inklinking langs dijken komen dijkwoningen ook vaak behoorlijk scheef te staan. Dit kan gemeten worden met tilt-meters. Omdat sinds 1970 de funderingen zowel een betonplaat als betonbalk constructie kregen, werd de gevoeligheid van gebouwen voor zettingen in de fundering minder. Doordat de sterkere fundering als een geheel beweegt, en de trillingen niet door scheuren in het metselwerk geabsorbeerd, worden deze trillingen naar boven in het gebouw doorgegeven, waardoor juist vanaf die periode zich veel kleine scheuren in de bovengelegen muren manifesteren.

Figuur 1-114. Het kaartje uit de Bosatlas geeft de aan hoeveel zetting er plaats zal vinden als men de grond ophooft met 1 m zand. In de provincie Groningen kan dat oplopen tot 0,8 m; dit gebeurt dan gelijkmatig over een lange periode. In de provincie Groningen komt de zone overeen met kleigronden.



Bij bijna alle schadegevallen die na de aardbevingen geclaimd werden is er sprake van een combinatie van gebouwbelasting, funderingen op staal en verschillende zetting van de grond. Wanneer tussen twee kanten van een gebouw de zetting verschillend is, kunnen er spanningen en scheuren in het metselwerk optreden. Door aardbevingen kunnen bij bestaande spanningen scheuren in dat metselwerk tot gevolg hebben.

Zoutlaag (Zechstein)

Eigenlijk 'zoutsteen' of *Zechstein*. Deze grondlaag is hard en taai tegelijkertijd en heeft daarom geen breukvlakken. Het *Zechstein* is gemiddeld ongeveer één km dik (plaatselijk soms met grote uitstulpingen) en sloot het methaangas in de onderliggende zandsteenlaag op, dat oorspronkelijk uit de daaronder liggende Carboon houdende laag kwam. De dikte van de zoutsteenlaag varieert over het gehele gebied (Nederland, Duitsland, Polen en de Noordzee), met op sommige plaatsen ruggen of heuvels van wel 2 km. In de provincie Drenthe komt het zoutsteen zelfs tot vlak aan het aardoppervlak. Hier wordt zout gedolven, wat zeer plaatselijk bodemdaling tot gevolg heeft. In enkele van deze zoutsteenkoepels wordt gedurende de zomer aardgas opgeslagen voor een eventuele piekvraag in de winter. Het zou kunnen dat die dikke zoutsteenruggen invloed hebben op de richting en sterkte van de aardbevingen.

Door de hardheid en taaheid van deze zoutsteenlaag die boven het gas-houdende zandsteen ligt veroorzaakt deze waarschijnlijk een kortere trilling tijdens aardbevingen dan in de gebieden waar deze zoutsteenlaag dieper ligt. De dikke taaie laag resulteert in een geleidelijke spreiding in de tijd van compactie zettingen in het onderliggende zandsteen. Eerst in een plaats, dan na een poosje rondom die eerste plek met kleinere bevingen en daarna nog meer en nog kleinere bevingen daaromheen.

Ook veroorzaakt de taaie zoutsteenlaag dat er slechts plaatselijk kleine zettingen (compactie) plaatsvinden en niet in een keer over een heel groot gebied. Elke keer vindt er een kleine zetting plaats wanneer de gasdruk en de eigen sterkte van het zandsteen de boven-belasting van de 3 km Zechstein en grondlagen niet meer kan weerstaan.

Figuur 1-115. De Zechsteinsee was een ondiepe binnenzee. Deze vormde zich ongeveer 260 miljoen jaar geleden over het tegenwoordige Noordwest-Europa uitstrekke. (Wikipedia) Tijdens de miljoenen jaren hete periode van de aarde verdampte het water in deze zee, waardoor er een zoutafzetting ontstond. Tot nu toe is het Groningse gasveld het grootste dat onder het Zechstein is gevonden. Er zijn veel kleine gasvelden onder het Noordzeegebied gevonden. (Afbeelding Internet)