



**Emmen** ◀  
Thedingecamp 2  
Postbus 152  
7800 AD  
T (0591) 67 13 13  
emmen@goudstikker.nl

## Rapport

**werknr.:** 20146258  
**project:** GRONINGEN; advies nieuwbouwregeling NAM  
**betreft:** leidraad

**onderdeel**

## Bevingbestendiger ontwerpen

**opdrachtgever**

**Nederlandse Aardolie Maatschappij b.v.**  
Postbus 28000  
9400 HH Assen

**opgesteld door**

**gecontroleerd door**

**goedgekeurd door**

5.1.2e

**Goudstikker - de Vries**  
is gevestigd in

Almere  
Assen  
Delft  
Emmen  
's-Hertogenbosch  
Sneek

www.goudstikker.nl

**datum**

11 maart 2015

**rapport**

R02

**revisie**

-

**status**

definitief





## Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding</b> .....	<b>2</b>
1.1	Achtergrond.....	2
1.2	Afbakening .....	2
1.3	Leeswijzer .....	2
1.4	Informatiebronnen .....	2
<b>2</b>	<b>Aardbevingen</b> .....	<b>4</b>
2.1	Algemeen.....	4
2.2	Oorzaak .....	5
2.3	Kenmerken.....	5
2.4	Gevolgen.....	5
<b>3</b>	<b>Aanwijzingen voor het ontwerp</b> .....	<b>7</b>
3.1	Reduceer de massa .....	7
3.2	Significante horizontale weerstand in twee richtingen.....	10
3.3	Regelmatigheid in plattegrond.....	12
3.4	Regelmatigheid in hoogte.....	14
3.5	Materialen en details met vermogen om te vervormen .....	16
3.6	Robuustheid .....	17
<b>4</b>	<b>Rekenmethodes</b> .....	<b>18</b>
4.1	Zijdelingse belastingmethode (lineair) .....	18
4.2	Spectrale modale responsieberekening (lineair) .....	19
4.3	Niet-lineaire statische (pushover) berekening .....	19
4.4	Niet-lineaire (dynamische) tijdsdomein berekening.....	20
4.5	Vergelijking rekenmethodieken.....	20
<b>5</b>	<b>Fundering</b> .....	<b>24</b>
5.1	Algemeen.....	24
5.2	Horizontale belasting.....	24
5.3	Verweking .....	25
<b>6</b>	<b>Geraadpleegde literatuur</b> .....	<b>26</b>
6.1	Voorschriften en richtlijnen .....	26
6.2	Literatuur .....	26
6.3	Internet.....	26
<b>7</b>	<b>Samenvatting en conclusies</b> .....	<b>27</b>
	DISCLAIMER .....	27



## **1 Inleiding**

### **1.1 Achtergrond**

In de provincie Groningen hebben zich in de afgelopen tien jaar zeven aardbevingen voorgedaan met een sterkte van 3 of hoger op de schaal van Richter. Deze aardbevingen werden veroorzaakt door de gaswinningen uit het Groningen-gasveld. Meestal zijn de bevingen heel licht en is er nauwelijks iets van te merken. Bij voelbare bevingen kan er schade aan gebouwen ontstaan.

In dit rapport wordt aangegeven waardoor de aardbevingen in Groningen worden veroorzaakt en wat daarvan het gevolg is voor gebouwen.

Op verzoek van NAM hebben wij vanuit onze expertise deze leidraad (dit rapport) opgesteld waarin op eenvoudige wijze uitleg is gegeven met welke basisregels een aardbevingsbestendiger ontwerp van gebouwen kan worden gemaakt. De leidraad is bedoeld als praktisch middel en is te gebruiken door opdrachtgevers (ook particuliere opdrachtgevers), bouwkundige ontwerp bureaus, architectenbureaus, bouwbedrijven en onderaannemers.

### **1.2 Afbakening**

De onderhavige leidraad omvat de resultaten van een (beperkte) literatuurstudie naar de effecten van een aardbeving op gebouwen. Aan de hand van praktische basisregels worden een 6-tal aanwijzingen gegeven om een naar de huidige maatstaven en wet- en regelgeving bevingbestendiger ontwerp te kunnen maken en, onder andere, daardoor wellicht (kostbare) aanpassingen op een later tijdstip in de planontwikkeling of de bouw te helpen voorkomen.

Om te toetsen of een ontwerp naar de huidige maatstaven en wet- en regelgeving voldoende bevingbestendig is moet een seismische berekening worden gemaakt. Dat kan op een aantal manieren. In de leidraad wordt ook aangegeven welke rekenmethodieken daarvoor in aanmerking komen en welke rekenmethodiek waarvoor het meest geschikt zou kunnen zijn.

### **1.3 Leeswijzer**

In hoofdstuk 2 is aangegeven waardoor de aardbevingen in het Groningen-gasveld worden veroorzaakt en wat bevingen doen met een gebouw. In hoofdstuk 3 zijn aanwijzingen voor een bevingbestendiger ontwerp opgenomen. Daarbij is in de figuren met de kleur rood aangegeven wat in het ontwerp beter kan worden vermeden en met de kleur groen wat in het ontwerp beter kan worden nagestreefd. Onder hoofdstuk 4 worden de verschillende rekenmethodieken behandeld. Hoofdstuk 5 gaat in op het specifieke risico van verweking van de ondergrond (fundering).

### **1.4 Informatiebronnen**

In Hoofdstuk 6 is een literatuurlijst opgenomen die betrekking heeft op de voorschriften, richtlijnen en overige geraadpleegde literatuur met betrekking tot belastingen ten gevolge van aardbevingen in het algemeen en specifiek in het Groningen-gasveld.



Niet alle geraadpleegde bronnen van Internet zijn vermeld. De gebruikte bronnen zijn niet bedoeld als uitputtend de enige bronnen.



## 2 Aardbevingen

### 2.1 Algemeen

In Nederland kennen we *tektonische* aardbevingen. Tektonische aardbevingen en vulkanische aardbevingen zijn *natuurlijke* aardbevingen.

Tektonische aardbevingen ontstaan door spanningen in de korst van de aarde. Deze spanningen worden veroorzaakt door verschillen in temperatuur en druk.

Vulkanische aardbevingen worden door vulkanisme veroorzaakt. De meeste natuurlijke aardbevingen hebben een bron op grote diepte (10 - 30 kilometer). Vulkanische aardbevingen zijn over het algemeen veel zwakker dan tektonische aardbevingen en komen in Nederland niet voor.

Tektonische aardbevingen vinden vooral in Zuid-Nederland plaats. Omdat er in de buurt van Nederland geen breuklijnen zijn, is de aardbeving meestal niet krachtig genoeg om door mensen te kunnen worden waargenomen.

De zwaarste aardbeving in Nederland ooit gemeten was in Roermond op 13 april 1992 en deze had een kracht van 5,8 op de schaal van Richter. Deze aardbeving werd tot in Tsjechie, Frankrijk en Engeland gevoeld. Ondanks dat de aardbeving op een diepte van ongeveer 17 kilometer was, zijn toch behoorlijk wat gebouwen en landschappen beschadigd.

In september 2011 is er in Duitsland, vlak bij de grens van Nederland, een natuurlijke aardbeving geweest. Deze had een kracht van 4,5 op de schaal van Richter. Deze aardbeving heeft geen (materiele) schade aangericht, maar is tot in de Randstad opgemerkt.

Tot aan een kracht van 5 op de schaal van Richter zal een aardbeving in het algemeen weinig schade tot gevolg hebben. Het effect is vergelijkbaar met een langsrijdende vrachtwagen, waarbij in sommige gevallen lichte voorwerpen gaan bewegen. Als de aardbeving krachtiger wordt dan 5 op de schaal van Richter zullen de gevolgen groter kunnen zijn met substantiële materiële schade en mogelijk slachtoffers.

Naast natuurlijke aardbevingen worden *niet natuurlijke* aardbevingen door mensen veroorzaakt. Ze kunnen bijvoorbeeld ontstaan door het ondergronds laten ontploffen van een atoombom.

In Nederland kennen we niet natuurlijke, ook wel *geïnduceerde* aardbevingen, die ontstaan door gaswinning in Noord-Nederland. De aarde bestaat uit verschillende gesteentelagen. Het aardgas in het Groningen-gasveld zit opgesloten op ongeveer drie kilometer diepte onder hoge druk in een poreuze zandsteenlaag. Een afsluitende zout- of kleilaag houdt het aardgas tegen. Jaarlijks vinden er tientallen aardbevingen plaats. Enkele daarvan zijn duidelijk voelbaar en kunnen ook schade aanrichten aan gebouwen (meestal in de vorm van scheuren in muren en pleisterwerk). De bron van de beving ligt relatief dicht onder het aardoppervlak (2 - 4 kilometer).

De zwaarste beving die Groningen tot nu toe kende was die in het dorp Huizinge in de gemeente Loppersum op 16 augustus 2012. Daar werd aanvankelijk een kracht van 3,4 gemeten. Na bijstelling kwam deze volgens het KNMI uit op een kracht van 3,6 op de schaal van Richter.



## 2.2 Oorzaak

Door winning van aardgas neemt de druk af. Daardoor wordt de zandsteenlaag door het gewicht van het bovenliggende gesteente ingedrukt. Dit heet compactie. De compactie door gaswinning veroorzaakt (naast gelijkmatige bodemdaling) de laatste jaren in toenemende mate ook aardbevingen in het Groningen-gasveld. Als een zandsteenlaag wordt ingedrukt, kunnen bij natuurlijke breuklijnen schoksgewijs verschuivingen in de zandsteenlaag ontstaan.

## 2.3 Kenmerken

Een aardbeving is een trilling of schokkende beweging van de aardkorst. Aardbevingen vinden plaats als er in de aardkorst plotseling energie vrijkomt. Door een beving ontstaan grondtrillingen, zowel horizontaal als verticaal. De verticale versnelling is doorgaans de helft tot twee derde (50% tot 67%) van de horizontale versnelling. Daarnaast hebben verticale trillingen in het algemeen veel minder invloed op de constructie van bouwwerken.

Voor het ontwerpen van een bevingbestendiger gebouw zijn daarom hoofdzakelijk de effecten van horizontale trillingen bepalend.

Het gevolg van horizontale trillingen is dat de massa van het gebouw boven de grond in beweging wordt gebracht, maar dan wel met een redelijk behoorlijke vertraging. Doordat het gebouw de plotselinge versnelling van de grond niet zo snel kan volgen ontstaan horizontale krachten op het gebouw. Deze krachten kunnen in alle richtingen ontstaan. Het zwaartepunt van de massa van het gebouw is in feite het zwaartepunt van de belasting op het gebouw.

Kenmerkend voor de bevingen in het Groningen-gasveld zijn de korte trillingstijd en de hoge frequentie (2 - 10 Hz) en tegenstelling tot natuurlijke (tektonische) bevingen die een relatief lange trillingstijd hebben en een lage frequentie (1 - 2 Hz).

## 2.4 Gevolgen

Door een aardbeving kunnen gebouwen behoorlijk beschadigd raken. Bij kleine aardbevingen kunnen er -in het algemeen- scheurtjes in muren ontstaan, of kleine delen van het gebouw afbreken. Als de aardbeving groter wordt, dan kunnen grote scheuren in muren ontstaan, de schoorsteen kan afbreken en dakpannen kunnen wegglijden.



Als de aardbeving erg sterk is, dan kunnen constructieve onderdelen van daken en vloeren het begeven of het gebouw kan helemaal instorten. Buiten de directe schade

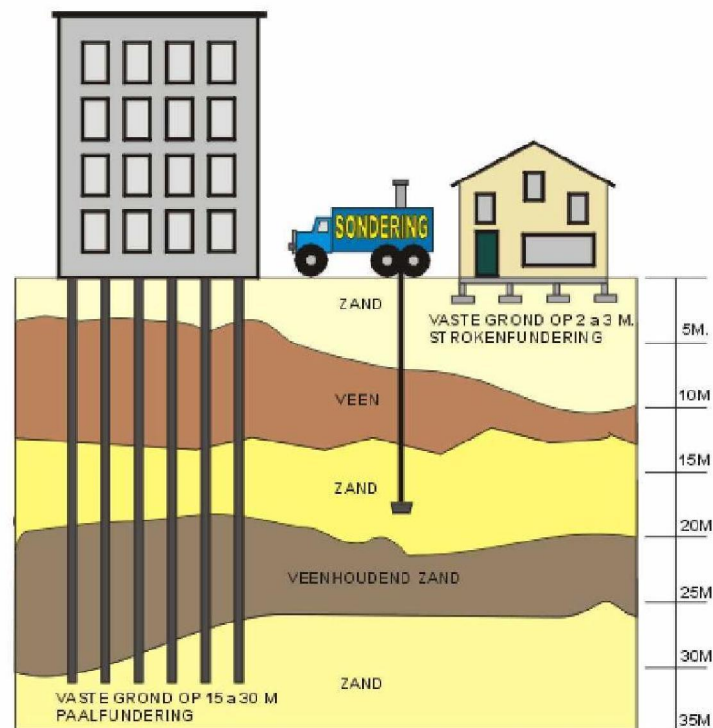


aan gebouwen kan het ook zijn dat er brand ontstaat (bijvoorbeeld door een gebroken gasleiding), of dat het gebouw onder water komt te staan als een waterleiding breekt.

Als het gebouw eenmaal in beweging is gekomen en er geen of onvoldoende dempingcapaciteit door vervorming van het gebouw is en/of een star gebouw onvoldoende sterk is, kan het gebouw instorten.

De beweging van het gebouw wordt gedempt als de toegepaste materialen en details voldoende vervormingcapaciteit hebben. Dit is vergelijkbaar met hoe de kreukelzone van een voertuig na een botsing werkt. De kinetische energie van het tot stilstand gebrachte voertuig wordt (deels) opgenomen door vervorming van de kreukelzone.

De resterende kinetische energie van de ingezette horizontale beweging van het gebouw moet vervolgens nog deels naar de ondergrond afgevoerd worden. De fundering van gebouwen (met name bij palen in slappe bovenlagen) moet hierop gedimensioneerd zijn om paalbreuk te voorkomen. Bij een gebouw wat heel star is (met weinig vervormingcapaciteit) zullen de krachten op de fundering groter zijn, wat ongunstiger is voor de fundering. Zie ook bij Hoofdstuk 5 Fundering.





## 3 Aanwijzingen voor het ontwerp

### 3.1 Reduceer de massa

Door het reduceren van de massa wordt de seismische belasting lineair (ofwel in dezelfde mate) gereduceerd.

Reductie van massa kan door lichte bouwmaterialen en/of lichte bouwsystemen toe te passen:

- *houtskeletbouw (HSB)*  
ofwel het toepassen van een houten draagconstructie (skelet of frame) al of niet in de vorm van complete elementen aangevoerd, in een gebouw



- *staalskeletbouw*  
waarmee bedoeld is een dragend skelet samengesteld uit stalen profielen zoals liggers, kolommen en stabiliteitsvoorzieningen en een verdere invulling van de ruwbouw met lichte vloeren, wanden, daken en gevels en andere afbouwelementen



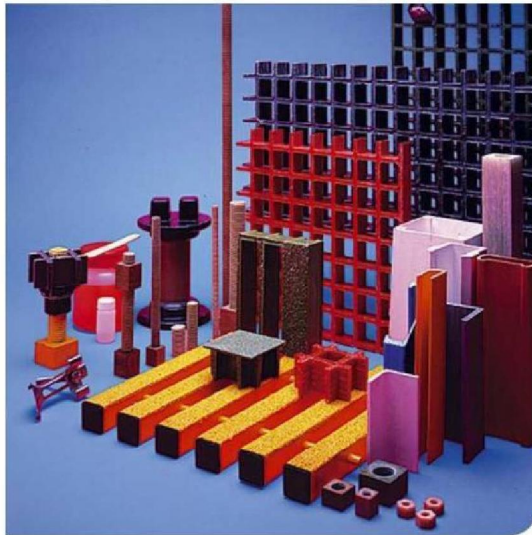




- *staalframebouw*  
waarbij de wanden, vloeren en daken als complete elementen worden aangevoerd en op de bouwplaats worden gemonteerd tot een totaal gebouw



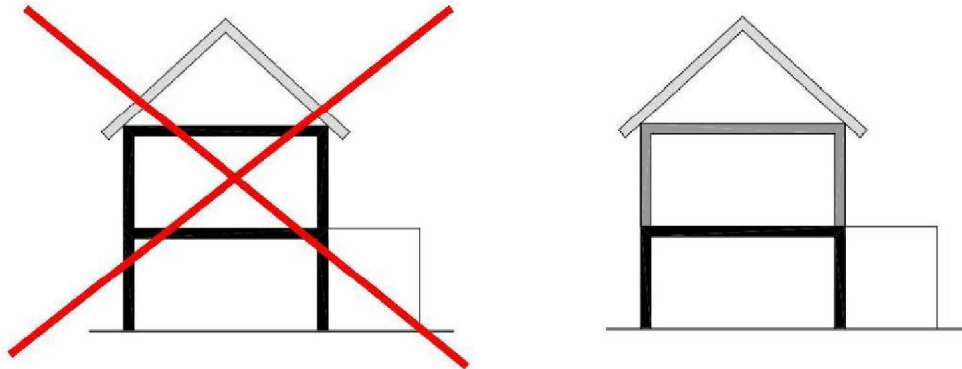
- *vezelversterkte kunststof (FRP)*  
FRP staat voor Fiberglass Reinforced Plastic (ook vezelversterkte polymeer) en is een composiet materiaal gemaakt van een polymeer matrix versterkt met vezels van glas, koolstof, aramide of basalt (is nog geen algemeen toegepast bouwsysteem)



Het voordeel van een bekende bouwmethodiek en toepassing van beproefde materialen waarvan de eigenschappen bekend zijn, is dat de seismische berekeningen nauwkeuriger kunnen worden gemaakt.

Het is gunstiger om een gebouw te ontwerpen waarbij bouwmaterialen met de zwaarste massa zich zo laag mogelijk in het gebouw bevinden en voor elementen hoger in het gebouw te kiezen voor bouwmaterialen met (veel) lichtere massa.

Het advies is daarom bij zware massa's zoals betonvloeren en gemetselde wanden deze maximaal tot aan het niveau van de eerste verdiepingvloer toe te passen en daarboven te ontwerpen met een lichter bouwsysteem.



*Figuur 1 - massa in de hoogte reduceren*

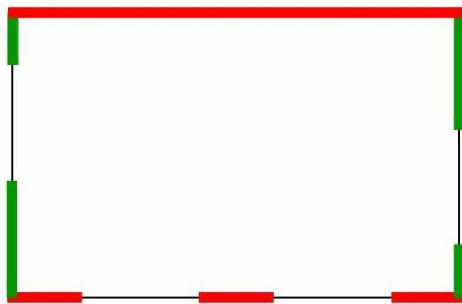
In de navolgende figuren is met de kleur rood aangegeven wat in het ontwerp beter kan worden vermeden en met de kleur groen wat in het ontwerp beter kan worden nagestreefd.



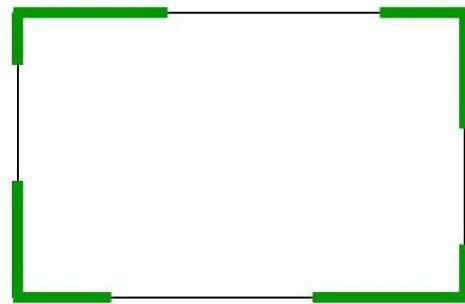
## 3.2 Significante horizontale weerstand in twee richtingen

Omdat de horizontale krachten uit een beving in alle horizontale richtingen kunnen optreden en in alle richtingen even groot kunnen zijn moet het ontwerp daarop worden afgestemd.

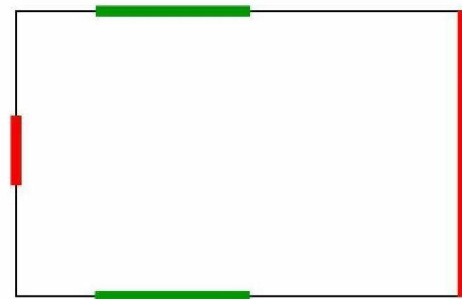
Het gevolg van het onjuist toepassen van deze ontwerpregel is *torsie* van het gebouw hetgeen zoveel mogelijk moet worden voorkomen want torsie levert bij een aardbeving in het algemeen de grootste schade op.



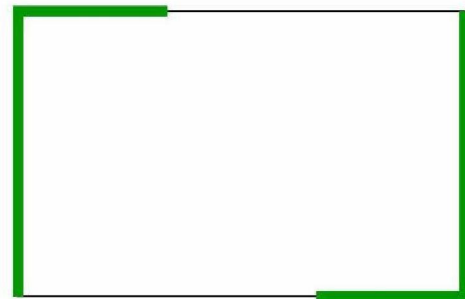
Figuur 2a - torsiegevoelig



Figuur 2b - niet torsiegevoelig



Figuur 3a - zeer torsie gevoelig



Figuur 3b - niet torsiegevoelig

Dat houdt het in dat in beide richtingen van het gebouw significante (hier in de betekenis van veelbetekenende) stabiliteitsvoorzieningen aanwezig moeten zijn.

De voorkeur is de stabiliteitsvoorzieningen per richting zo veel mogelijk en met dezelfde lengte aan de buitenzijden van het gebouw te plaatsen (dus bij voorkeur in de gevels).

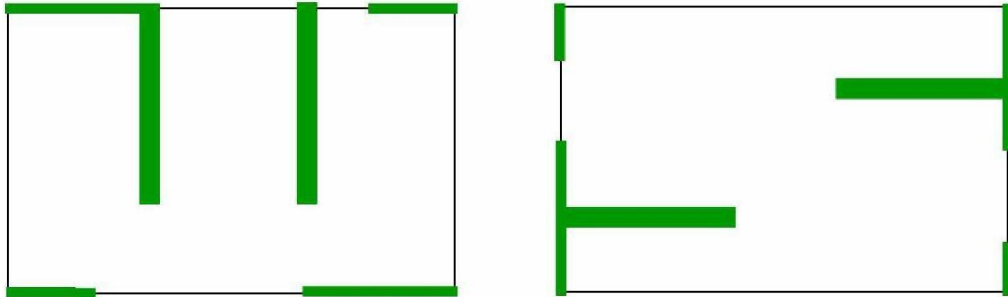
Als dat niet mogelijk is kan in één richting (bij voorkeur in de lengterichting van het gebouw) worden gekozen voor minimaal één significante stabiliteitsvoorziening, in het zwaartepunt van het gebouw. Zie Figuur 4.

Voor een gelijkmatige krachtenverdeling is het van belang om deze stabiliteitsvoorzieningen zo gelijkmatig en zo symmetrisch mogelijk te plaatsen.

Om de hoge optredende horizontale krachten op te kunnen nemen is het raadzaam lange gesloten wanden als stabiliteitsvoorziening in het ontwerp op te nemen.



Bij gebruik van het binnenspouwblad van gevels voor de stabiliteit dient rekening te worden gehouden met de beperking van de stijfheid door de invloed van grote gevelopeningen zoals schuifpuien etc.



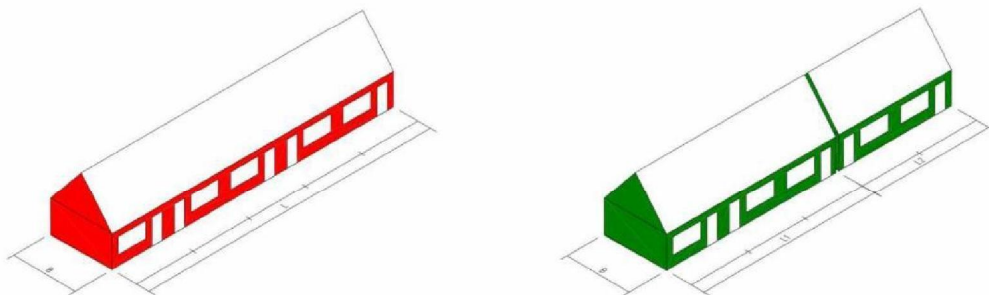
*Figuur 4 - stabiliteitsvoorzieningen in het zwaartepunt van het gebouw*

De vloerstijfheid moet dusdanig zijn dat vervormingen geen invloed hebben op de krachtsverdeling. Daarom moeten vloeren met schijfwerking worden toegepast.

Vloeren met schijfwerking kunnen zijn:

- Bekistingsplaatvloeren (breedplaatvloer) met een doorgaande bovenwapening
- Kanaalplaatvloeren met een meer dan minimaal gewapende druklaag
- Houten vloeren met een dubbele beplating en onderling verspringende naden

In dat verband is de verhouding lengte  $L$  / breedte  $B$  van het gebouw ten behoeve van de horizontale stijfheidverdeling beperkt. Volgens Eurocode 8 (Ontwerp en berekening van aardbevingbestendige constructies) is deze verhouding ten hoogste  $L / B = 4$  )



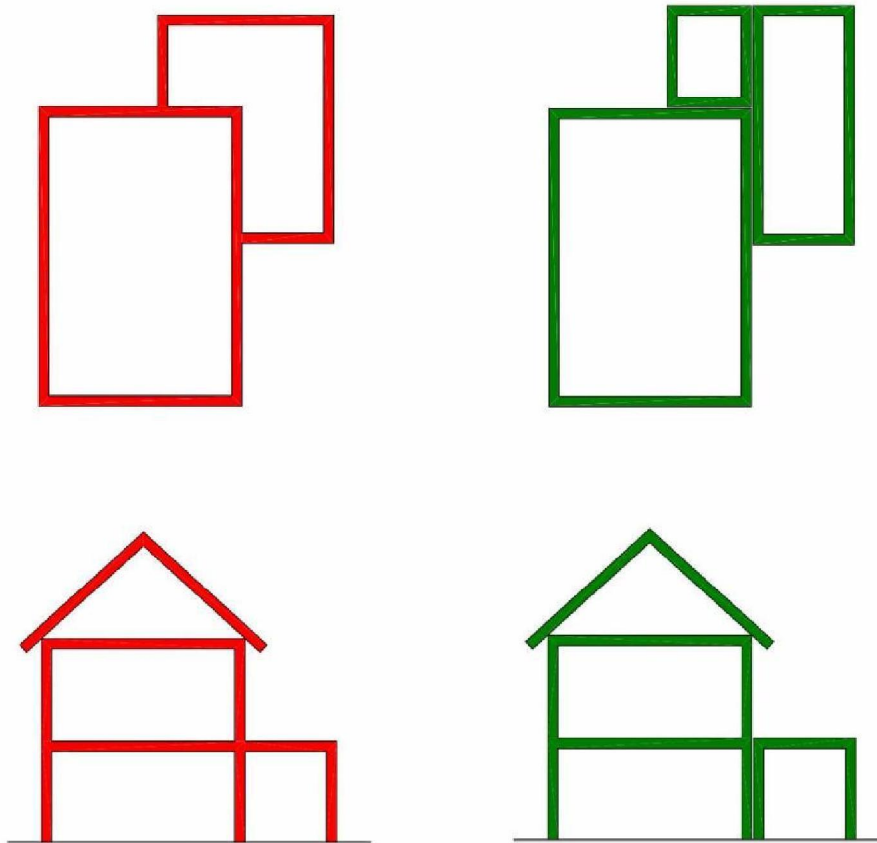
*Figuur 5 - verhouding lengte / breedte beperken tot  $L / B = 3$*

Het advies is de verhouding lengte/breedte van het gebouw tot  $L / B = 3$  te beperken. Bij langere gebouwen zullen dus extra dilataties nodig zijn en daardoor meer stabiliteitsvoorzieningen in de lengterichting.



### 3.3 Regelmatigheid in plattegrond

Het ontwerp van de plattegrond dient zo symmetrisch mogelijk te zijn en bij benadering rechthoekig. Als dat niet lukt, moet de plattegrond worden opgedeeld in symmetrische (bij benadering rechthoekige) delen, zodanig dat elk deel van de plattegrond voldoet aan de eis van regelmatigheid.

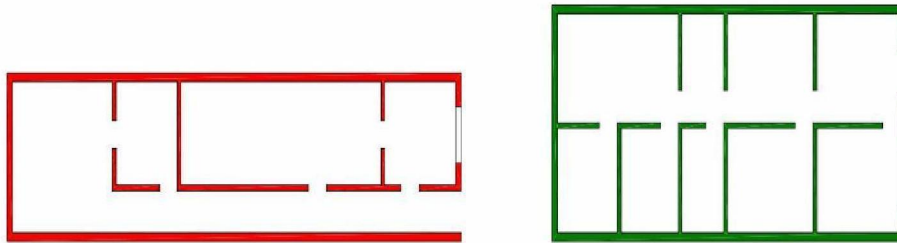


*Figuur 6 - plattegrond (op basis van gebouw) terugbrengen tot symmetrische delen*

Grote sparingen (zoals trappgaten) in vloeren dienen in het ontwerp symmetrisch geïmponeerd te worden. Het toepassen van (grote) vides dient te worden vermeden



In de plattegrond dienen de wanden zo gelijkmatig mogelijk (optimaal is geheel gelijkmatig en symmetrisch) te worden verdeeld, met name de wanden die als stabiliserende wand kunnen worden aangemerkt. Immers alle onderdelen van het gebouw dragen bij tot een vergroting van de bevingbestendigheid.



*Figuur 7 - regelmatigheid in plattegrond*

Door een ontwerp met een gelijkmatige verdeling van de draagconstructie is een gelijkmatiger krachtsafdracht mogelijk met minder kans op schade.



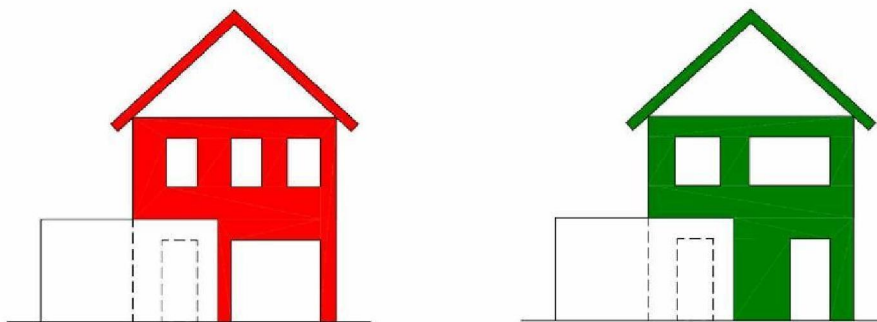
## 3.4 Regelmatigheid in hoogte

Bij het ontwerp van het gebouw is het uitgangspunt een heldere draagstructuur. Daarbij zijn de dragende wanden boven elkaar geplaatst en zijn puntvormige ondersteuning onder wandschijven op hoger gelegen verdiepingen vermeden.



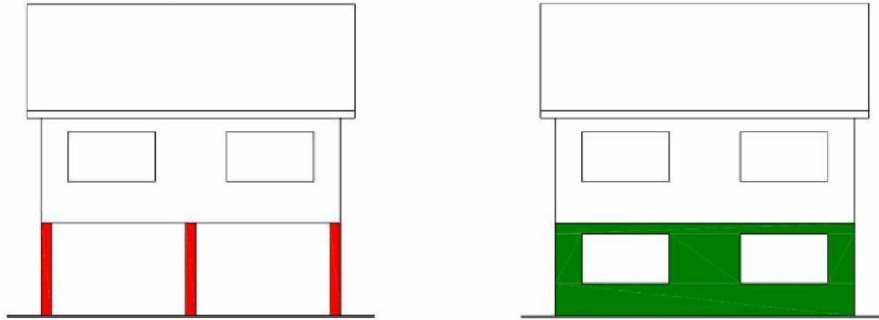
*Figuur 8 - heldere draagstructuur door wanden boven elkaar te plaatsen*

Verder is er sprake van regelmatige verdeling van gevelopeningen ten behoeve van zoveel mogelijk symmetrie in de hoogte en in de lengte. Hierdoor worden verschillen in verplaatsingen vermeden. Een zwakke etage heeft een gevel met daarin grotere raamopeningen dan in de etage erboven of heeft een gesloten gevel daarboven. Een dergelijk gevelontwerp is zeer ongunstig en kan instorting van de bovengelegen etages door de geringere stijfheid (waardoor grotere verplaatsing) van de zwakke etage tot gevolg hebben.



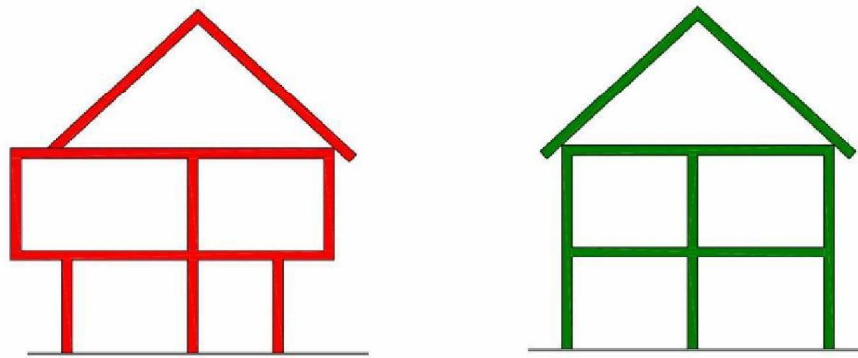
*Figuur 9 - regelmatige verdeling van openingen (kleine openingen beneden)*

Het is dus raadzaam een draagstructuur met wanden op kolommen en penanten (tenzij hoog in het gebouw) te vermijden en een draagstructuur met kolommen of smalle penanten op de begane grond en een grotere massa op bovengelegen verdiepingen eveneens te vermijden (weak storey building).

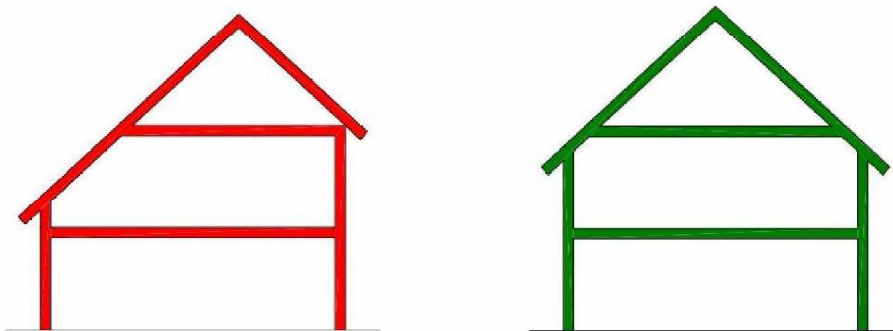


*Figuur 10 - geen draagstructuur met kolommen of smalle penanten*

In het ontwerp is het raadzaam niet kiezen voor grote overstekken, of grote vides ter plaatse van de verdiepingvloeren. Het oppervlak van een verdieping is ten hoogste gelijk aan en bij voorkeur kleiner dan het oppervlak de onderliggende bouwlaag.



*Figuur 11 - geen grote overstekken ten behoeve van een grotere verdieping*



*Figuur 12 - symmetrie in de hoogte van de gevels*





### **3.5 Materialen en details met vermogen om te vervormen**

Ductiliteit of vervormbaarheid is de mate waarin een materiaal plastische vervorming toelaat (onder wisselende belastingrichtingen) zonder te bezwijken.

De essentie hierbij is het onderscheid dat kan worden gemaakt tussen *ductiele* deformatie, waarbij het materiaal (na overschrijden van de vloeispanning) heel blijft en *brosse* deformatie waarbij het materiaal breekt.

Toe te passen ductiel (vervormbaar) materiaal is onder andere:

- staal
- gewapend beton
- hout
- materialen met enigszins vergelijkbare gelijke eigenschappen

Te vermijden bros (onvervormbaar) materiaal is onder andere:

- ongewapend beton
- metselwerk

Een bevingbestendiger ontwerp met ductiel materiaal is gebaseerd op de vorming van een stabiel bezwijkmechanisme (opname energie uit beving) in uiterste grenstoestand. Hierdoor zal in plaats van lokaal bezwijken (van brosse elementen) vervorming ontstaan ter plaatse van bewust gekozen plastische scharnieren in de verbindingen (of in de elementen).

De plastische sterkte van de aansluiting dient hoger te zijn dan de sterkte van de aansluitende elementen dan wel bij een plastisch scharnier in een element dient de sterkte van de verbindingen hoger te zijn. In beide gevallen zal dan wel een grote vervorming, maar geen bezwijken (door breuk) optreden.

Bijkomend voordeel is dat de constructie de krachten beter kan verdelen naar andere (sterkere) elementen, zonder te bezwijken.

Een dergelijke constructie heeft een zekere mate van redundantie (redundant hier in de betekenis van overvloedig) en is het beste te vergelijken met een apparaat dat is uitgevoerd met meervoudig aanwezige onderdelen, waardoor het geheel goed blijft functioneren wanneer één of meer onderdelen defect raken of verloren gaan.

Bros materiaal zoals ongewapend beton of metselwerk kan in een aardbevingsbestendig ontwerp wel worden toegepast.

Een ongewapende wand dient dan te worden voorzien van een raamwerk van horizontale en verticale wapening langs de randen met in beugels opgesloten hoofdwapeningstaven. En ongewapend metselwerk dient te worden opgesloten in een soortgelijk raamwerk van gewapende betonpenanten en betonliggers (latei/vloer).



## 3.6 Robuustheid

Onder robuustheid wordt hier verstaan een sterke en stevig gebouwde constructie. In de praktijk betekent dit een andere denkwijze, minimaal is niet langer voldoende.

Dat betekent onder andere het volgende:

- continuïteit (onderlinge verbinding elementen zijn even sterk als de elementen)
- stijve schijven vloeren en daken (optimale weerstand uit het vlak van de wanden)
- wanden rondom optimaal gesteund (door vierzijdige koppeling ook aan vloeren)
- langswanden optimaal gesteund (met daar waar mogelijk extra dwarswanden).
- elementen verticaal gekoppeld in plaats van droge stapelbouw

De robuustheid kan vergroot worden door:

- toepassen van een tweede draagweg <sup>1)</sup>
- geen grote gevelopeningen in het ontwerp
- vloertypes met vierzijdige belastingafdracht
- beperking van vloeroverspanningen (niet maximaal)
- geen slanke verticale constructies

<sup>1)</sup> Een tweede draagweg houdt in dat het falen van een enkel of enkele constructieve elementen niet mag leiden tot het falen (instorten) van het gebouw als geheel. Toevoegen van elementen waarmee in gebouwen een tweede draagweg gerealiseerd kan worden kan eenvoudiger zijn en de voorkeur hebben boven het versterken van de eerste (of bestaande) draagweg.

Behalve beproefde materialen en bouwsystemen en toegepaste vloer- en wanden schijven is het raadzaam dat ook de verbindingen robuust zijn uitgevoerd.

Het buitenspouwblad van de in Nederland gangbare spouwmuur is geen robuuste constructie. De koppeling van het buitenspouwblad aan het binnenspouwblad moet van meer spouwankers worden voorzien dan de gebruikelijke 4 stuks per m<sup>2</sup>. Al naargelang de hoogte dienen meer spouwankers te worden toegepast omdat de bevingbelasting in de hoogte toeneemt en daarmee ook het risico.

Speciale aandacht is vereist voor het ontwerp en de detaillering van andere risicovolle elementen niet behorend tot de hoofdconstructie, zoals schoorstenen, dakopstanden, ornamenten, balkons en luifels. Het risico op schade en valgevaar is hier aanmerkelijk groter. De risico's kunnen worden beperkt door dergelijke bouwdelen niet in het ontwerp op te nemen of uit te voeren met adequate constructies (kolommen onder balkons) en/of lichte materialen (schoorstenen met steenstrips). Voor gemetselde buitenspouwbladen zijn in ruime mate alternatieven aanwezig.



## 4 Rekenmethodes

Berekeningen voor gebouwen dienen te worden gebaseerd op EC8-1 en EC8-5 en (met de status van advies) het Memo "Voorlopige ontwerpuitgangspunten voor nieuwbouw en verbouw onder aardbevingsbelasting ten gevolge van gaswinning in het Groningenveld" d.d. 15 mei 2014 (revisie 1, 23 mei 2014).

Voor beoordeling van nieuwbouw en verbouw was voor de interim periode tot het uitkomen van de nationale bijlagen het advies Eurocode 8 (NEN-EN 1998-serie) toe te passen waarbij voor de noodzakelijke input NDP's (Nationally Determined Parameters) kan worden uitgegaan van waarden uit het Memo.

Ten tijde van de totstandkoming van dit rapport is de Ontwerp NPR 9998:2015 (februari 2015) gepubliceerd, vooruitlopend op de publicatie van de nationale bijlagen van de afzonderlijke delen van de NEN-EN 1998-serie (Eurocode 8) en met de vermelding "Publicatie uitsluitend voor commentaar".

*EZ (ministerie van Economische Zaken) heeft onlangs aangegeven dat vanaf heden (11 maart 2015) de NPR 9998 toegepast dient te worden bij het berekenen van aardbevingsbelastingen en het ontwerpen van aardbevingbestendige gebouwconstructies. Hiermee is het Memo "Voorlopige ontwerpuitgangspunten voor nieuwbouw en verbouw onder aardbevingsbelasting ten gevolge van de gaswinning in het Groningenveld" d.d. 15 mei 2014 (revisie 1, 23 mei 2014) dus komen te vervallen.*

In EC8 worden drie methodes aangegeven om de bevingbelasting te berekenen:

- 1) Lateral force methode of analysis (EC8: § 4.3.3.2)
- 2) Modal response spectrum analysis (EC8: § 4.3.3.3)
- 3) Non-linear methods (EC8: § 4.3.3.4)

Bij de niet-lineaire methode volgens EC8: § 4.3.3.4 zijn twee verschillende methodieken onderscheiden.

Alle vier methodieken worden in de navolgende paragrafen nader toegelicht.

### 4.1 Zijdelingse belastingmethode (lineair)

De zijdelingse belastingmethode ook wel genoemd de Lateral Force Method (LFM) of Lateral Force Analysis (LFA) is de minst complexe methode en voldoende voor de bepalen van de bevingbelasting op gebouwen. De zijdelingse belasting methode is gebaseerd op een 1-massa-veer-demper-systeem. Hierbij dient het zwaartepunt van de massa bepaald te worden en aan de hand daarvan wordt een buigend moment uit de horizontaal kracht ten gevolge van de aardbeving berekend.

De uitgangspunten en te hanteren waarden voor toepassing van deze methode worden aangegeven in EC8-1 en de Memo.

Indien de LFM wordt toegepast, moet de constructie voldoen aan de uitgangspunten zoals beschreven in EC8-1 en de Memo:

- symmetrie in de plattegrond
- symmetrie in de hoogte



- ongevoelig voor torsie in elk van de twee hoofdrichtingen
- constante verdiepinghoogte (al of niet gesimuleerd)

Gebouwen met een ontwerp volgens de leidraad in dit rapport voldoen aan deze uitgangspunten.

## 4.2 Spectrale modale responsieberekening (lineair)

De spectrale modale responsieberekening, ook wel genoemd Modal Response Spectrum Analysis (MRSA) is een quasi statische analyse met de volgende kenmerken:

- 90% van de massa activeren (bepaalt het aantal uitbuigingsvormen dat meegerekend moet worden)
- horizontaal spectrum
- verticaal spectrum
- massa

Deze methode dient met specifieke software te worden uitgevoerd: software van AxisVM, Abacus of Scia Engineer.

## 4.3 Niet-lineaire statische (pushover) berekening

Niet-lineaire statische (pushover) berekening, ook wel genoemd Pushover Method of de Pushover Analysis is een fysisch en geometrisch niet-lineaire statische analyse uitgevoerd onder de voorwaarden van een constante zwaartekracht belasting en een constant toenemende horizontale belasting.

Volgens EC8-1 kan de pushover analyse toegepast worden om:

- a) om de overstrenght ratio values  $\alpha_u / \alpha_l$  te bepalen
- b) om de locatie van plastische mechanismen en constructieve schade in te schatten
- c) om de constructieve prestaties van bestaande of verbouwde gebouwen te beoordelen voor de toepassing van NEN-EN 1998-3
- d) als alternatief voor de 'Lateral Force method' (de gedragsfactor q in combinatie met een elastisch ontwerp)

Wanneer de pushover berekening (geen gebruik van een verhoogde q) als alternatief wordt gebruikt voor de 'Lateral Force method' heeft dit als 'voordeel' dat de constructie niet behoeft te voldoen aan de detailleringregels zoals beschreven in de NEN-EN 1998-1:2004.

De constructie kan worden gedimensioneerd en uitgewerkt conform de detailleringregels zoals in de verschillende materiaalgebonden EN-normen beschreven.

Het rekenen met de 'Pushover Method' kost meer tijd dan de 'Lateral Force Method'. Ook vraagt de 'Pushover Method' veel kennis van de te berekenen en te modelleren constructie (gedrag, sterkte en stijfheid).



De uitkomsten zijn sterk afhankelijk van een juiste modellering. De 'Pushover Method' kan hierdoor gevoelig zijn voor foute uitkomsten.

## 4.4 Niet-lineaire (dynamische) tijdsdomein berekening

De niet-lineaire (dynamische) tijdsdomein berekening, ook wel genoemd de Time History Analysis (Non-lineair method) kan als alternatieve methode worden toegepast en is de meest specifieke en complexe methode.

Deze methode dient met specifieke software te worden gemaakt en kenmerkt zich door:

- een berekening over de tijd
- de werkelijke of verschaalde versnellingen / verplaatsingen van een aardbeving op de fundering van een 2D of 3D model
- trillingen in drie richtingen
- elastisch en plastisch-elastisch en plastisch
- gebruik van materiaal schademodelen

## 4.5 Vergelijking rekenmethodieken

In het algemeen geldt voor de beide lineaire methoden:

- Toepasbaar bij lage waarden van te verwachten grondversnellingen aangezien de nauwkeurigheid van de methoden dan minder beïnvloed wordt door niet lineair gedrag van de constructie en de materialen (belastingen blijven in het elastische gebied)
- Relatief korte rekentijd
- (Wellicht) effectief voor bredere toepassing wanneer meer studie gedaan is en resultaten beschikbaar komen voor aangepaste (hogere)  $q$ -factoren (ductiliteit)

De gedragsfactor  $q$  heeft directe relatie met de ductiliteitklasse. Een hogere ductiliteit leidt tot een hogere  $q$ -factor en daarmee een lagere bevingbelasting, dus hoe gunstiger (zie ook bij Grenstoestanden).

### *Zijdelingse belastingmethode (lineair)*

- Toepasbaar voor gebouwen met een duidelijke draagconstructie en belastingafdracht, waarbij het gedrag voornamelijk wordt bepaald door de eerste eigen frequentie
- Eenvoudige gebouwen welke wegens gebruiksdoeleinden in het elastische gebied blijven
- Onderdelen van gebouwen
- Gebouwen met een ontwerp volgens de leidraad in dit rapport voldoen aan deze uitgangspunten.

### *Spectrale modale responsieberekening (lineair)*



- Toepasbaar voor gebouwen met een meer complexe geometrie, zeker in het geval van discontinuïteiten in vorm en stijfheid
- Onderdelen van gebouwen
- Gebouwen met een ontwerp volgens de leidraad in dit rapport voldoen aan deze uitgangspunten.

### *Niet-lineaire statische (pushover) berekening*

- Toepasbaar bij hogere waarden van te verwachten grondversnellingen
- Relatief eenvoudige constructies zoals huizen en grotere en monumentale gebouwen

### *Niet-lineaire (dynamische) tijdsdomein berekening*

- Toepasbaar voor belangrijke of waardevolle gebouwen waarbij de (hoge) investering in analyse en beoordeling gerechtvaardigd is
- Veel voorkomende identieke gebouwen waarbij de resultaten van de tijdsdomein berekening bruikbaar is voor een groot aantal gebouwen
- Validatie van andere rekenmethodieken
- Kalibratie middels testen

### *Grenstoestanden*

In EC8-1 worden drie grenstoestanden onderscheiden:

1. Near Collapse (NC): de bouwconstructie staat op instorten maar stort niet in
2. Significant Damage (SD): significante beschadiging
3. Damage Limitation (DL): schade beperking

De grenstoestand NC dient te allen tijde te worden beschouwd terwijl de toestanden SD en DL optioneel kunnen worden beschouwd. Bij een berekening conform EC8-1 en de Memo kan met de grenstoestand NC worden volstaan.

### *Ductiliteit*

Ductiliteit of vervormbaarheid is de mate waarin een materiaal plastische vervorming toelaat. De mate van ductiliteit is gecategoriseerd in EC8-1 in ductiliteitklassen.

Hierin zijn de volgende categorieën onderscheiden:

DCL:	lage ductiliteit
DCM:	medium ductiliteit
DCH:	hoge ductiliteit

Bij een constructie die valt in DCL (lage ductiliteit) zullen geringere verplaatsingen toelaatbaar zijn dan voor een constructie in DCM of DCH alvorens te bezwijken.

De materiaalkeuze voor de hoofddraagconstructie, de ductiliteitsklasse en het constructietype bepalen welke gedragsfactor ( $q$ ) gehanteerd dient te worden.



De ductiliteitklassen zijn daarmee gerelateerd aan de gedragsfactor  $q$ . Een hogere ductiliteitklasse zal leiden tot een hogere gedragsfactor.

De gedragsfactor ( $q$ ) beïnvloedt de hoogte van de piek van het elastisch respons spectrum. Er geldt: hoe hoger de gedragsfactor, hoe lager de piek van het spectrum, hoe lager de bevingbelasting.

De hoogste gedragsfactor wordt verkregen door een combinatie van de volgende eigenschappen:

1. Een hoofddragconstructie met veel vervormingcapaciteit
2. Een evenredige hoogte verdeling van verdiepingen
3. De keuze voor een ductiel materiaal (materiaal met een hoge ductiliteit)

De te hanteren waardes voor de gedragsfactor  $q$  kunnen worden verkregen vanuit EC8-1 (opmerkingen bij tabellen gedragsfactoren) of vanuit een pushover berekening. Bij toepassing van de LFM zullen de waardes volgens EC8-1 afdoende zijn.

### *Gevolgklasse*

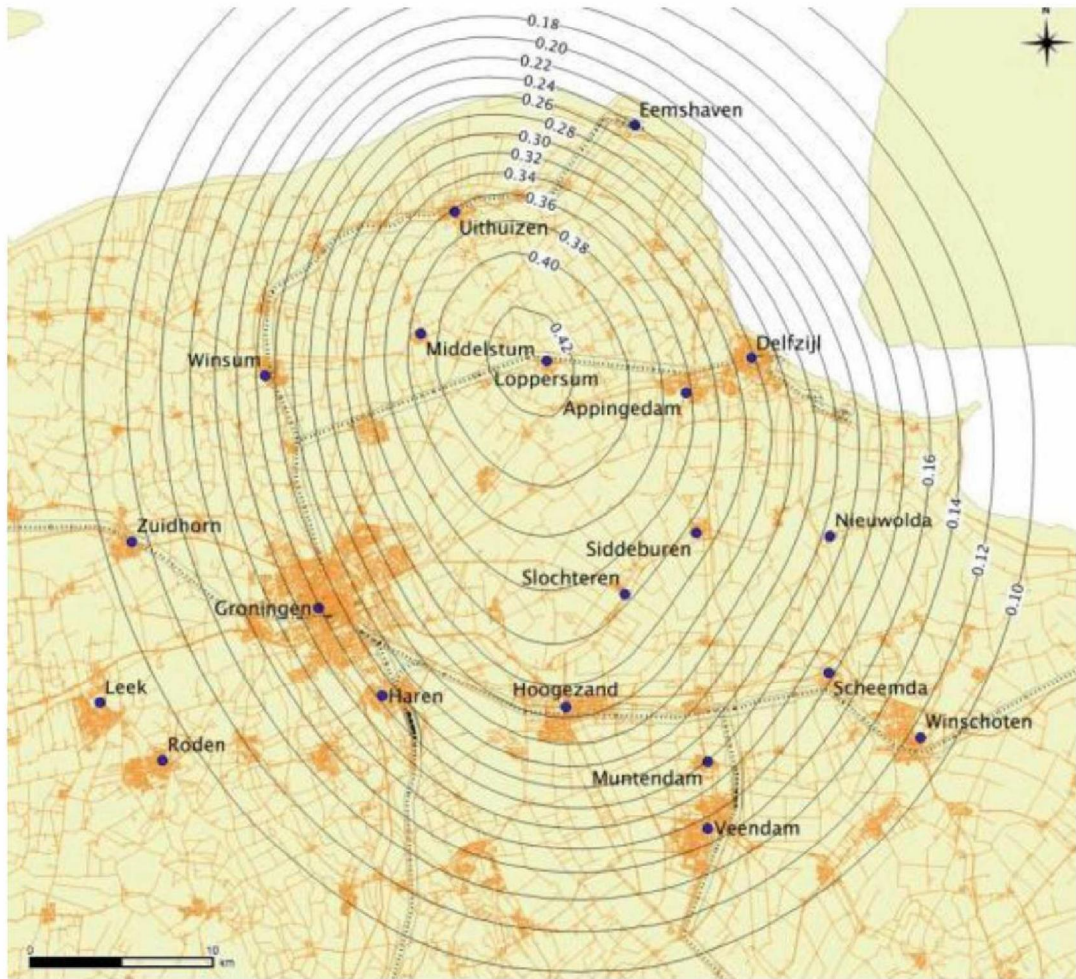
Gebouwen worden geclassificeerd in gevolgklasse CC1a, CC1b, CC2 of CC3 waarbij  $\gamma_I = 0,9$  (CC1a), 1,58 (CC1b), 1,91 (CC2), 2,48 (CC3), volgens Memo. CC1a is een gevolgklasse waarbij er geen eis is vanuit de menselijke veiligheid. Gebouwen waarbij menselijke veiligheid in het geding is als de constructie faalt vallen in gevolgklasse CC1b t/m CC3 (schoorstenen vallen dus in gevolgklasse CC1b).

PGA = 0,10g t/m 0,42g (volgens Figuur 2)

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$  (voor zover niet anders wordt voorgeschreven)

$a_{g,ref} = \text{PGA} \cdot g \text{ [m/s}^2\text{]}$

rekenwaarde voor de piekgrondversnelling  $a_g = a_{g,ref} \cdot \gamma_I \text{ [m/s}^2\text{]}$



Figuur 2 - Piekgrondversnelling afhankelijk van de locatie (Bron: Memo)





## **5 Fundering**

### **5.1 Algemeen**

De ondergrond en de fundering van een gebouw worden ten gevolge van een beving belast op:

- verticale massa van het totale gewicht
- horizontale kracht  $Q$  uit de aardbevingsberekening
- moment  $M$  uit de aardbevingsberekening

Door deze belastingen zal de grondslag en fundering onder een gebouw niet gelijkmatig worden belast. Eén zijde zal zwaarder worden belast dan de andere zijde. Hierdoor treedt er verschil op in grondspanning of paalbelasting. Zonder extra fundering kan dit leiden tot scheefstand en als gevolg daarvan instorting van het gebouw.

Een deel van de kinetische energie van de ingezette horizontale beweging van het gebouw als gevolg van een aardbeving moet naar de ondergrond afgevoerd worden. De fundering van gebouwen (met name bij palen in slappe bovenlagen) moet hierop gedimensioneerd zijn om paalbreuk te voorkomen. Bij een gebouw wat heel star is (met weinig vervormingcapaciteit) zullen de krachten op de fundering groter zijn, wat ongunstiger is voor de fundering.

*Bij een fundering op palen zijn de specifieke aandachtspunten:*

- Paalwapening
- Koppeling paal aan funderingsbalk <sup>1)</sup>
- Koppeling funderingsbalk aan begane grondvloer <sup>1)</sup>

*Bij een fundering op staal (strokenfundering) zijn de specifieke aandachtspunten:*

- Koppeling fundering aan metselwerk op de fundering <sup>1)</sup>
- Koppeling metselwerk op de fundering aan begane grondvloer <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> dimensioneren op bevingbelasting

Bij een fundering op staal (betonplaat, waarbij de betonplaat tevens de begane grondvloer is) zijn deze aandachtspunten niet van toepassing.

### **5.2 Horizontale belasting**

Uit de gewichtsberekening volgt de massa van het gebouw. Uit de massa van het gebouw volgt de bevingbelasting conform de te hanteren voorschriften.

Bij de controle van zowel een fundering op staal als een fundering op palen op aardbevingsbelasting moet rekening worden gehouden met de horizontale belasting op de fundering. Bij palen kan dit leiden tot grotere afmeting en/of meer paalwapening.



### 5.3 Verweking

De horizontale versnellingen in de grond tijdens een aardbeving leiden tot extra schuifspanning. Vooral losgepakt zand zal hierdoor willen verdichten.

Voor verdichting moet het water tussen de korrels eerst uitstromen, maar hier is tijdens de aardbeving geen tijd voor, zodat wateroverspanningen optreden. Deze leiden tot tijdelijke vermindering van korrelspanningen en daarmee tot vermindering van sterkte en stijfheid van het zand.

Als de trilling sterk is kan het zand zijn sterkte en stijfheid zelfs compleet verliezen (dit wordt verweking genoemd). Verwekingsgedrag kan zowel optreden bij een snelle eenmalige schuifspanningsverhoging (statisch), als bij snelle herhaalde schuifspanningswisselingen (cyclisch). Naast de grootte van de extra schuifspanning is dus ook het aantal schuifspanningswisselingen van invloed.

Bij de tot op heden opgetreden aardbevingen in Groningen zijn geen locaties vastgesteld waar verweking is opgetreden. Bij een sterkere aardbeving (vanaf ongeveer 0,2 g) neemt de kans op verweking volgens de huidige inzichten sterk toe. Voor klei en veenlagen bestaat dit gevaar niet of nauwelijks. Bij potklei is geen risico op verweking aanwezig.

Ten gevolge van de verweking door wateroverspanning neemt de conusweerstand af.

De reductiefactor van de conusweerstand is

$$\sqrt{1 - r_u}$$

waarin  $r_u$  = de relatieve waterspanning (zie EC8-5)

Ten behoeve van de berekening van een aardbevingsbestendiger fundering behoort een geotechnisch bodemonderzoek inclusief funderingsadvies en een beschouwing van mogelijk optredende verweking te worden opgesteld.



## **6 Geraadpleegde literatuur**

### **6.1 Voorschriften en richtlijnen**

- [1] NEN-EN 1998-1:2005 + C1:2009 + A1:2013  
Eurocode 8 - Ontwerp en berekening van aardbevingbestendige constructies  
Deel 1: Algemene regels, seismische belasting en regels voor gebouwen
- [2] NEN-EN 1998-5: 2005  
Eurocode 8 - Ontwerp en berekening van aardbevingsbestendige constructies  
Deel 5: Fundering, grondkerende constructies en geotechnische aspecten
- [3] MEMO Voorlopige ontwerpuitgangspunten voor nieuwbouw en verbouw onder  
aardbevingsbelasting ten gevolge van de gaswinning in het Groningenveld d.d. 15  
mei 2014 (revisie 1, 23 mei 2014)

### **6.2 Literatuur**

- [4] Leidraad berekenen van een aardbevingsbelasting conform EC8/Memo volgens de  
Lateral Force Method of analysis, ingenieursbureau Zonneveld b.v.
- [5] Ontwerpen van gebouwen onder aardbevingsbelasting, Training Ontwerpen van  
gebouwen op aardbevingen, NEN 30 juni 2014, ingenieursbureau ARUP

### **6.3 Internet**

- [6] Diverse geraadpleegde bronnen, niet nader vernoemd



## **7 Samenvatting en conclusies**

Bij het ontwerpen van gebouwen op de gevolgen van belastingen uit een aardbeving kan praktisch rekening worden gehouden met de zes aanwijzingen die in deze leidraad staan aangegeven.

Hierdoor is het mogelijk een seismische berekening te maken volgens de (lineaire) Zijdelingse belastingmethode (Lateral Force Method) waarbij de uitkomsten naar alle waarschijnlijkheid zullen leiden tot een economisch acceptabele overschatting van de belastingen.

Als ondergrens voor de gedragsfactor  $q$  kan de Eurocode worden geraadpleegd. Met een pushover berekening kan een hogere gedragsfactor worden bepaald, wat gunstig is voor de belasting uit bevingen.

Bij gebouwen is door de dynamische belasting uit een aardbeving het risico op verweking van een eventueel direct onderliggende zandlaag (ook bij fundering op palen) aanwezig. Hier dient nadrukkelijk rekening mee te worden gehouden.

### **DISCLAIMER**

Dit rapport bevat een leidraad waarin op eenvoudige wijze uitleg is gegeven met welke basisregels een aardbevingsbestendiger ontwerp van gebouwen kan worden gemaakt. De leidraad is bedoeld voor praktisch gebruik door opdrachtgevers (ook particuliere opdrachtgevers), bouwkundige ontwerp bureaus, architectenbureaus, bouwbedrijven en onderaannemers en bevat tevens aanbevelingen over de te volgen rekenmethodiek om te voldoen aan de grenstoestand NC van de Ontwerp NPR 9998:2015 (publicatie februari 2015). Ingenieursbureau voor Bouwtechniek Goudstikker - de Vries BV en/of Nederlandse Aardolie Maatschappij BV aanvaardt geen enkele aansprakelijkheid voor de bouwwerken die mede met de leidraad in dit rapport tot stand worden gebracht en/of de financiële gevolgen die uit het gebruik van dit rapport voortvloeien. De indiener en hoofdconstructeur blijven verantwoordelijk en aansprakelijk voor de bouwconstructies die in dit rapport worden behandeld.