



Leidraad berekenen van een aardbevingsbelasting conform NEN-EN 1998/NPR9998:2015 volgens de zijdelingse belastingsmethode

ONDERDEEL	ZIJDELINGSE BELASTINGSMETHODE
OPDRACHTGEVER	Nederlandse Aardolie Maatschappij b.v. Postbus 2800 9400 HH Assen
OPGESTELD DOOR	ir. W.B. van der Linde
GECONTROLEERD DOOR	ing. H.J. Hoorn RC
GOEDGEKEURD DOOR	ir. M.J. Durian RO
DATUM	12-05-2016
VERSIE	v01
REVISIE	-
STATUS	DEFINITIEF

Zonneveld ingenieurs b.v.
Postbus 4398
3006 AJ Rotterdam
Delftseplein 27
3013 AA Rotterdam
Tel +31(0)10 452 88 88
Fax +31(0)10 452 95 50
info@zonneveld.com
www.zonneveld.com

DISCLAIMER

Dit rapport bevat een leidraad waarin een berekeningsmethode voor een bouwconstructie is uitgewerkt om te voldoen aan de grenstoestand NC van de NPR9998:2015 (nl), publicatie december 2015. De aangegeven berekening zal voor elk project variëren en dient te worden aangepast aan de constructieve uitgangspunten van het te berekenen project. De initiatiefnemer/hoofdconstructeur van een project is verantwoordelijk voor de juiste toepassing van de in dit rapport gehanteerde normen/voorschriften.

Zonneveld ingenieurs 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.

Inhoudsopgave

Voorwoord	2
1 Inleiding	3
2 Inleiding tot berekeningsmethode	4
3 Stappenplan	5
4 Toelichting stappenplan zijdelingse belastingsmethode	7
Stap 1: Controleer of de constructie voldoet aan de voorwaarden	7
Stap 2: Bepaal gevolgklasse, grenstoestand en k_{ag}	9
Stap 3: Bepaal $a_{g;ref}$ afhankelijk van de bouwlocatie	9
Stap 4: Bepaal het geschikte ontwerpresponspectrum	9
Stap 5: Bepaal ductiliteitsklasse	10
Stap 6: Bepaal gedragsfactor q	10
Stap 7: Bepaal spectrale respons $S_d(T_1)$	12
Stap 8: Bepaal totale gebouwmassa m	12
Stap 9: Bepaal correctiefactor λ	13
Stap 10: Bepaal afschuifkracht t.p.v. fundering F_b	14
Stap 11: Bepaal verdeling van de horizontale seismische krachten F_i	14
Stap 12: Bepaal bijkomende torsie-effecten	14
5 Constructieve afwijkingen	16
Regelmatigheid in horizontaal vlak (plattegrond)	16
Demping	17
6 Slotwoord	18

Voorwoord

Voor het ontwerp van een aardbevingsbestendige constructie dienen constructieberekeningen volgens de NEN-EN 1998-1:2004 en NPR9998:2015 (dec 2015) te worden gemaakt.

Een initiatiefnemer of opdrachtgever van een bouwproject dient hiervoor een constructieadvies aan te vragen. Als het constructieadvies wordt ingediend volgens deze leidraad zal het beoordelingsproces sneller verlopen omdat dan in één keer alle gewenste informatie kan worden aangeleverd. De initiatiefnemer wordt verzocht deze leidraad aan hun constructieadviseur ter beschikking te stellen.

1 Inleiding

Ten behoeve van het bepalen van een aardbevingsbelasting volgens de nationale voorschriften heeft Zonneveld Ingenieurs deze leidraad opgesteld. Uitgangspunt voor deze leidraad zijn de NEN-EN 1998-1:2004 en NPR9998:2015 (december 2015).

Deze leidraad bevat uitgangspunten, ontwerpadviezen en een te hanteren stappenplan voor het definiëren van een aardbevingsbelasting volgens de *zijdelingse belastingmethode*. De *zijdelingse belastingmethode* is de meest eenvoudige rekenwijze om aan te tonen dat een project aardbevingsbestendig kan worden gebouwd. Voor meer geavanceerde methoden dient NEN-EN 1998 te worden geraadpleegd.

De berekening van een aardbevingsbelasting conform deze methode mag slechts worden toegepast indien aan de uitgangspunten voldaan wordt. Het stappenplan gehanteerd worden om de belasting te bepalen waarbij de ontwerpadviezen in overweging genomen kunnen worden.

2 Inleiding tot berekeningsmethode

Aardbevingsberekeningen dienen voor de Nederlandse situatie gebaseerd te worden op NPR9998:2015 [1] en EN1998-1:2004 [2]. In [1] worden drie methodes gepresenteerd om een aardbevingsbelasting te berekenen:

- 1) Zijdellingse belastingsmethode ([1] §4.3.3.2)
- 2) Spectrale modale responsberekening ([1] §4.3.3.3)
- 3) Niet-lineaire methoden ([1] §4.3.3.4)

In Tabel 1 wordt globaal weergegeven wanneer elke methode toegepast dient te worden.

Tabel 1 Overzicht verschillende berekeningsmethoden

	Zijdellingse belastingsmethode	Spectrale modale responsberekening	Niet-lineaire methoden
Wanneer toe te passen?	Voor gebouwen waarvan de respons niet significant wordt beïnvloed door andere trilvormen dan de fundamentele trilvorm in elke hoofdrichting.	Voor gebouwen die niet voldoen aan de voorwaarden voor toepassing van de zijdelingse belastingsmethode.	Om aan te tonen dat het gebouw bestand is tegen aardbevingen met minder conservatieve oplossingen dan bepaald met de lineaire rekenmethoden.

Van bovengenoemde methodes is de zijdelingse belastingsmethode de meest eenvoudige methode, gebaseerd op een 1-massa-veer-demper-systeem. Uitgangspunten en te hanteren getallen voor toepassing van deze methode worden gepresenteerd in [1] en [2] en in deze leidraad.

In deze leidraad zal verder alleen ingegaan worden op de zijdelingse belastingsmethode.

Grenstoestanden

In [2] worden drie grenstoestanden onderscheiden:

1. Near Collapse (NC): bouwconstructie staat vrijwel op instorten
2. Significant Damage (SD): significante beschadiging
3. Damage Limitation (DL): beperkte schade

De grenstoestand NC dient te allen tijde te worden beschouwd terwijl de toestanden SD en DL optioneel kunnen worden beschouwd. Deze leidraad richt zich alleen op controle van de grenstoestand NC.

Niet-lineair gedrag van de constructie

Door de capaciteit van ductiele (dissipatieve) constructieve systemen om seismische belastingen op te nemen in het niet-lineaire gebied, is het in het algemeen toelaatbaar om bij het ontwerp of de verificatie via een equivalente elastische berekening een lagere belastingen aan te houden dan de belasting overeenkomend met een volledig lineair-elastische respons. De reductie wordt verwezenlijkt door de gedragsfactor q in te voeren bij bepaling van het ontwerpresponspectrum.

3 Stappenplan

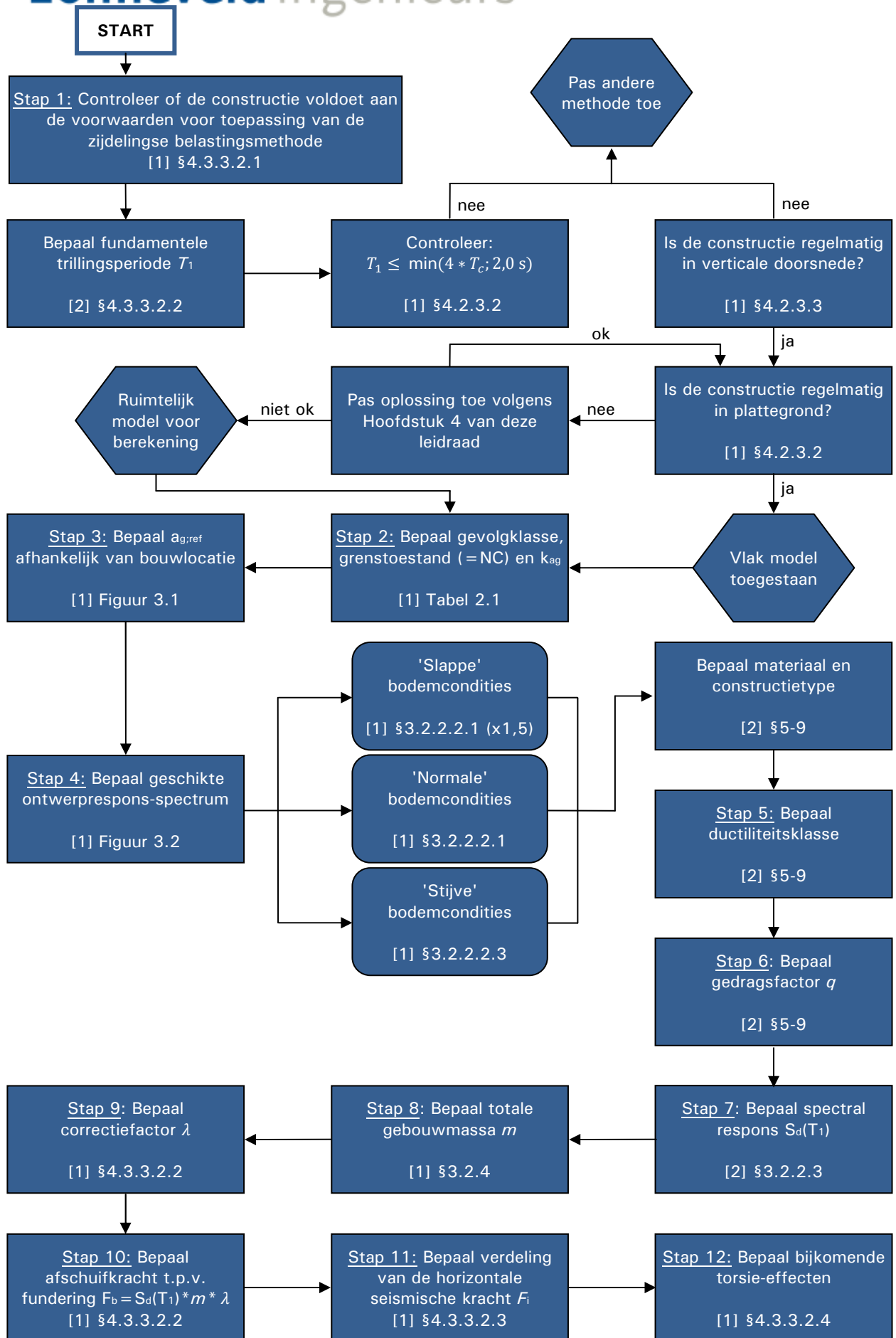
Voor de bepaling van de bovengrens van de aardbevingsbelasting volgens de zijdelingse belastingsmethode volgens [1] en [2] wordt aanbevolen de volgende stappen te doorlopen:

Stap 1:	Controleer of de constructie voldoet aan de voorwaarden voor toepassing van de zijdelingse belastingsmethode	[1] §4.3.3.2.1
Stap 2:	Bepaal gevolgklasse, grenstoestand en k_{ag}	[1] Tabel 2.1
Stap 3:	Bepaal $a_{g,ref}$ afhankelijk van de bouwlocatie	[1] Figuur 3.1
Stap 4:	Bepaal het geschikte ontwerpresponspectrum, afhankelijk van de bodemcondities van de bouwlocatie	[1] Figuur 3.2
Stap 5:	Bepaal ductiliteitsklasse	[2] §5-9
Stap 6:	Bepaal gedragsfactor q	[2] §5-9
Stap 7:	Bepaal spectrale respons $S_d(T_1)$	[1] §3.2.2.3
Stap 8:	Bepaal totale gebouwmassa m	[1] §3.2.4
Stap 9:	Bepaal correctiefactor λ	[1] §4.3.3.2.2
Stap 10:	Bepaal afschuifkracht t.p.v. fundering F_b	[1] §4.3.3.2.2
Stap 11:	Bepaal verdeling van de horizontale seismische krachten over de hoogte F_i	[1] §4.3.3.2.3
Stap 12:	Bepaal bijkomende torsie-effecten	[1] §4.3.3.2.4

Deze stappen dienen te worden doorlopen voor elk van de twee hoofdrichtingen.

Op de volgende pagina is een stroomschema weergegeven waarmee een aardbevingsbelasting berekend kan worden volgens de zijdelingse belastingsmethode, overeenkomstig met het stappenplan. De eerste stappen van het stroomschema toetsen of de zijdelingse belastingsmethode mag worden toegepast voor de constructie. De volgende stappen beschrijven de bepaling van de aardbevingsbelasting volgens de zijdelingse belastingsmethode. De bijbehorende artikelen, tabellen en figuren van [1] en [2] en deze leidraad zijn vermeld voor elke stap.

Uiteindelijk kan door het stappenplan of stroomschema te doorlopen de afschuifkracht ter plaatse van de fundering ten gevolge van aardbevingsbelasting F_b volgens de zijdelingse belastingsmethode worden berekend. In Hoofdstuk 4 wordt een toelichting gegeven op de verschillende stappen.



4 Toelichting stappenplan zijdelingse belastingsmethode

Stap 1: Controleer of de constructie voldoet aan de voorwaarden

Uitgangspunt van deze leidraad is dat gebruik gemaakt kan worden van de zijdelingse belastingsmethode. De constructie dient te voldoen aan de uitgangspunten zoals beschreven in [1], [2] en deze leidraad.

De zijdelingse belastingsmethode mag worden toegepast voor gebouwen waarvan de respons niet significant wordt beïnvloed door andere trilvormen dan de fundamentele trilvorm in elke hoofdrichting. Aan dit criterium wordt geacht voldaan te zijn indien het gebouw voldoet aan twee criteria, met betrekking tot de fundamentele trillingsperiode T_1 en regelmatigheid in verticale doorsnede, zie [1] 4.3.3.2.1.

Fundamentele trillingsperiode T_1

De fundamentele trillingsperiodes T_1 in de twee hoofdrichtingen dienen te voldoen aan, [1] 4.3.3.2.1:

$$T_1 \leq \min(4 * T_c; 2,0 \text{ s})$$

waarin:

T_c = Bovengrens van de trillingsperiodes waarvoor de spectrale versnelling constant is, volgens [1] 3.2.2.2.1.

Voor $a_{g,ref} \geq 0,04g$ is $4 * T_c > 2,0s$. Het criterium $T_1 \leq 2,0s$ is daarom maatgevend voor het toepassingsgebied van NPR9998:2015 (december 2015).

Trillingstijd T_1 bepalen

De fundamentele trillingsperiodes T_1 in de twee hoofdrichtingen kunnen op verschillende manieren worden bepaald, [2] 4.3.3.2.2:

[2] 4.3.3.2.2 (2) Met behulp van dynamische berekeningsmethoden (zoals de Rayleigh methode)

[2] 4.3.3.2.2 (3) Gebouwen tot maximaal 40m¹ kan de fundamentele trillingsperiode T_1 (in sec) worden geschat volgens:

$$T_1 = C_t * H^{3/4}$$

waarin:

$$C_t = \begin{cases} 0,085 & \text{Momentvaste stalen frames} \\ 0,075 & \text{Momentvaste betonnen frames en excentrisch} \\ & \text{geschoorde stalen frames} \\ 0,050 & \text{Alle overige constructies} \end{cases}$$

H = Hoogte van het gebouw, in m¹, vanaf de fundering of de bovenkant van een als star te beschouwen kelder

[2] 4.3.3.2.2 (4) Voor gebouwen met betonnen of metselwerken dwarswanden mag de waarde van C_t worden bepaald volgens:

$$C_t = 0,075/\sqrt{A_c} \text{ waarin:}$$

$$A_c = \sum [A_i * (0,2 + (l_{wi}/H))^2]$$

waarin:

A_c = Totale effectieve oppervlak van de dwarswanden op begane grondniveau van de constructie, in m^2

A_i = Effectieve dwarsdoorsnede van dwarswand i in de beschouwde richting op begane grondniveau van de constructie, in m^2

H = Hoogte van het gebouw, in m^1 , vanaf de fundering of de bovenkant van een als star te beschouwen kelder

l_{wi} = De lengte van dwarswand i op begane grondniveau in de richting parallel aan de aangrijpende kracht, in m^1 , met de beperking dat $l_{wi}/H \leq 0,9$

[2] 4.3.3.2.2 (5) De fundamentele trillingsperiode T_1 (in sec) mag worden geschat volgens:

$$T_1 = 2 * \sqrt{d}$$

waarin:

d = De horizontale elastische verplaatsing aan de bovenkant van de constructie, in m^1 , veroorzaakt door de zwaartekrachtbelastingen in horizontale richting aan te brengen

Regelmatigheid in verticale doorsnede

Voorwaarden voor de toepassing van de verschillende analyse methoden worden gepresenteerd in Tabel 2, [1] Tabel 4.1.

Tabel 2 Voorwaarden voor toepassing verschillende berekeningsmethoden, [1] Tabel 4.1

Regelmaat		Toegelaten vereenvoudiging		Gedragfactor q
Horizontaal vlak (plattegrond)	Verticaal vlak (verticale doorsnede)	Model	Lineair-elastische berekeningsmethode	(voor lineaire berekeningsmethoden)
Ja	Ja	Vlak	Zijdelingse belasting	Referentiewaarde
Ja	Nee	Vlak	Modaal	Verlaagde waarde
Nee	Ja	Ruimtelijk	Zijdelingse belasting	Referentiewaarde
Nee	Nee	Ruimtelijk	Modaal	Verlaagde waarde

Voor de berekening van de aardbevingskracht met de zijdelingse belastingsmethode is constructieve regelmaat in het verticale vlak (verticale doorsnede) vereist. Of de constructie hieraan voldoet dient gecontroleerd te worden aan de hand van [1] §4.2.3.3.

Uit bovenstaande tabel volgt ook dat regelmatigheid in horizontaal vlak (plattegrond) vereist is in het geval een vlak constructief model wordt gebruikt. Of de constructie hieraan voldoet dient gecontroleerd te worden aan de hand van [1] §4.2.3.3. Zie hiervoor ook Hoofdstuk 5.

Stap 2: Bepaal gevolgklasse, grenstoestand en k_{ag}

De indeling van de gevolgklassen volgens NEN-EN 1990 Tabel NB.20 geldt, waarbij de voorbeelden daarvan zoals gegeven in tabel NEN-EN 1990 NB.21 kunnen worden gehanteerd. Zie voor nadere aanduiding ook [1] Tabel 2.1 en 2.2.

Bepaal k_{ag} volgens [1] Tabel 2.1 en 2.2. Hanteer grenstoestand Near Collapse (NC).

Stap 3: Bepaal $a_{g;ref}$ afhankelijk van de bouwlocatie.

Zie [1] Figuur 3.1 voor de contourplot van de referentiepiekgrondversnellingen $a_{g;ref}$ in g bij een herhalingsstijd van 475 jaar.

Stap 4: Bepaal het geschikte ontwerpresponspectrum

In [1] Figuur 3.2 wordt onderscheid gemaakt tussen 'slappe bodemcondities', 'normale bodemcondities' en 'stijve bodemcondities'.

- Voor 'normale bodemcondities' geldt dat de eigenschappen van slappe en stijve bodemcondities niet van toepassing zijn. De meeste bodemcondities in de regio zijn geclassificeerd als 'normale bodemcondities'. Het ontwerpresponspectrum wordt bepaald volgens [1] §3.2.2.2.1 of [1] §3.2.2.2.3 Formule 3.21-3.23.
- Voor 'slappe bodemcondities' geldt dat de grond binnen $10m^1$ vanaf maaiveld veen pakketten of lagen met veel organisch materiaal van samen ten minsten $1m^1$ dik bevat. Het ontwerpresponspectrum wordt bepaald door het responspectrum volgens [1] §3.2.2.2.1 of [1] §3.2.2.2.3 Formule 3.21-3.23 te vermenigvuldigen met factor 1,5.
- Voor 'stijve bodemcondities' geldt $v_{s;30} > 250m/s$, geen individuele lagen met $v_s < 200m/s$ en $a_{g;ref} < 0,2g$, zie ook [1] Figuur 3.0. Het ontwerpresponspectrum wordt bepaald volgens [1] §3.2.3.1 of [1] §3.2.2.2.3 Formule 3.24-3.26.

Bepaal het geschikte ontwerpresponspectrum, afhankelijk van de bodemcondities van de bouwlocatie.

Stap 5: Bepaal ductiliteitsklasse

Ductiliteit of vervormbaarheid is de mate waarin een materiaal of constructie een plastische vervorming toelaat. Ductiliteit kan beschouwd worden voor elementen, verbindingen en de gehele constructie. De mate van ductiliteit is in [2] gecategoriseerd in ductiliteitsklassen. Hierin zijn de categorieën lage ductiliteit (DCL), medium ductiliteit (DCM) en hoge ductiliteit (DCH) te onderscheiden.

Voor nieuw te bouwen constructies wordt ductiliteitsklasse DCM en DCH aanbevolen. Hiervoor dient de constructie te voldoen aan de ontwerp- en detailleringsregels voor dissipatief constructiegedrag gegeven in [2] §5-9. Lage ductiliteit (DCL) wordt voor nieuwbouw alleen aanbevolen voor gebieden met een lage seismische activiteit ($a_{g,ref} < 0,04$ g voor staal, staal-beton, $a_{g,d} < 0,20$ g voor beton).

Stap 6: Bepaal gedragsfactor q

De gedragsfactor q mag zijn bepaald met behulp van een push-over-analyse of met behulp van bepalingen uit [2] §5-9.

De materiaalkeuze voor de hoofddraagconstructie, de ductiliteitsklasse en het constructietype bepalen welke gedragsfactor gehanteerd dient te worden. Een hogere gedragsfactor leidt tot een grotere reductie van het ontwerpresponspectrum. De hoogste gedragsfactor wordt verkregen door een combinatie van de volgende eigenschappen:

1. Hoofddraagconstructie met veel vervormingcapaciteit
2. Regelmatigheid in verticale doorsnede, zie [2] §4.2.3.1
3. De keuze voor een ductiel materiaal

Voor constructies opgebouwd uit beton, staal, staal-beton, hout en metselwerk worden in [2] §5-9 waardes gegeven voor de gedragsfactor q_0 . Een samenvatting hiervan is weergegeven in de Tabel 3.

In de tabel is vermenigvuldigingsfactor α_u/α_1 opgenomen. De vermenigvuldigingsfactor representeert de verhouding tussen de waarde α_u waarbij voldoende plastische scharnieren zijn ontstaan voor ontwikkelen van globale constructieve instabiliteit en de waarde α_1 waarbij het eerste plastisch scharnier ontstaat. De waarde van de vermenigvuldigingsfactor α_u/α_1 kan worden bepaald met behulp van een niet-lineaire statische pushover analyse of met behulp van benaderingswaarden uit [2]. Bij toepassing van de zijdelingse belastingsmethode zijn de benaderingswaarden uit [2] afdoende.

Tot slot wordt opgemerkt dat voor grenstoestand NC de waarde van gedragsfactor q mag zijn vermenigvuldigd met factor 1,33 volgens [1] §3.2.2.2.3.

Tabel 3 Overzicht gedragsfactor q_0 en ductiliteitsklassen per materiaal en constructietype

Materiaal	Constructietype	Gedragsfactor q_0		
		DCM	DCH	
Beton	a) Momentvast frame, tweevoudig (dual) systeem, gekoppelde wanden systeem	$3,0 \alpha_u/\alpha_1$	$4,5 \alpha_u/\alpha_1$	
	b) Ongekoppelde wanden systeem	3,0	$4,0 \alpha_u/\alpha_1$	
	c) Torsieslap systeem	2,0	3,0	
	d) Omgekeerd pendulum systeem	1,5	2,0	
Staal	a) Momentvast frame ¹⁾	4	$5,0 \alpha_u/\alpha_1$	
	b) Frame met concentrische schoren ¹⁾	Diagonale schoren	4,0	4,0
		V-schoren	2,0	2,5
	c) Frame met excentrische schoren ¹⁾	4,0	$5,0 \alpha_u/\alpha_1$	
	d) Omgekeerd pendulum systeem ¹⁾	2,0	$2,0 \alpha_u/\alpha_1$	
	f) Momentvast frame met concentrische schoren	4,0	$4,0 \alpha_u/\alpha_1$	
	g) Momentvast frame met 'infills'	Ongekoppelde betonnen of metselwerken vullingen, in contact met frame	2,0	2,0
Ongekoppelde vullingen, niet in contact met momentvast frame		4,0	$5,0 \alpha_u/\alpha_1$	
Staal-beton	a), b), c) en d)	Zie Staal	Zie Staal	
	e) Samengestelde constructietypen	Samengestelde wanden (Type 1 en Type 2)	$3,0 \alpha_u/\alpha_1$	$4,0 \alpha_u/\alpha_1$
		Samengestelde of betonnen wanden gekoppeld door stalen of samengestelde liggers (Type 3)	$3,0 \alpha_u/\alpha_1$	$4,5 \alpha_u/\alpha_1$
f) Samengestelde dwarswanden met stalen plaat	$3,0 \alpha_u/\alpha_1$	$4,0 \alpha_u/\alpha_1$		
Hout	- Gelijmde panelen, vastgezet met nagels en bouten - Genagelde wandpanelen met genagelde, geniete, of geschroefde wandschijven van gipsvezelplaat (houtskeletbouw) - Vakwerken met deuvels en bouten - Constructies met portalen met niet-dragende geboute, genagelde of geschroefde 'infill frames' - Mits gewapend, verbindingen voorzien van polyurethaan ingelijmde draadeinden	2,0	-	
	- Genagelde wandpanelen met genagelde, geniete of geschroefde wandschijven van triplex of spaanplaat of OSB (houtskeletbouw) - Vakwerken met draadnagels - Portalen waarbij de verbindingen zijn gerealiseerd met DVW en buizen - Portalen met gedeuvelde en geboute verbindingen, mits met voldoende slankheid en gewapend	-	3,0	
Materiaal	Uitvoeringsmethode	Gedragsfactor q_0		
Metselwerk	Ongewapend metselwerk dat alleen voldoet aan de eisen van NEN-EN 1996-1-1	1,5		
	Ongewapend metselwerk dat voldoet aan de eisen van NEN-EN 1998-1 ($\alpha = N_{Ed}/(l * t * f_d)$)	$\alpha \leq 0,08$	2,0	
		$0,08 < \alpha \leq 0,23$	$2,28 - 3,4\alpha$	
		$0,23 < \alpha$	1,5	
Ingesloten metselwerk	2,0			
Gewapend metselwerk	2,5			

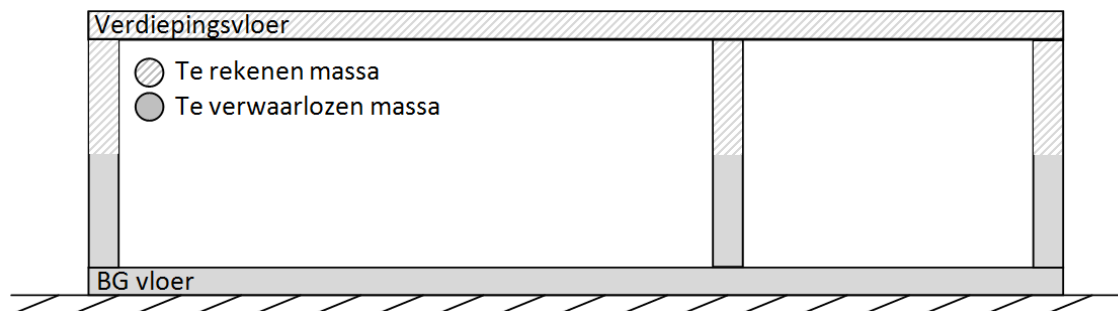
¹⁾ Geldt ook voor materiaal staal-beton

Stap 7: Bepaal spectrale respons $S_d(T_1)$

Bepaal de waarde van het ontwerpspectrum bij trillingsperiode T_1 , $S_d(T_1)$, met behulp van het gekozen ontwerpresponspectrum uit Stap 4 en de trillingstijd T_1 bepaald in Stap 1, zie [1] §3.2.2.3.

Stap 8: Bepaal totale gebouwmassa m

In de bepaling van de totale gebouwmassa hoeft de massa van de fundering, een als star te beschouwen kelder of een star met de fundering verbonden begane grondvloer niet mee te worden genomen. De in rekening te brengen massa is zodoende alle massa boven de helft van de wanden op de begane grond, zie ook onderstaande afbeelding.



De traagheidseffecten van de seismische ontwerpbelasting (totale gebouwmassa m) moeten worden bepaald rekening houdend met de aanwezigheid van de massa's behorende bij alle zwaartekrachtbelastingen die voorkomen in de volgende belastingscombinatie, [1] §3.2.4:

$$\sum G_{k,j} \text{ "+" } \sum \psi_{E,i} * Q_{k,i}$$

waarin:

$G_{k,j}$ = Karakteristieke waarde van blijvende belasting j

"+" = 'Te combineren met'

$\psi_{E,i}$ = Combinatiecoëfficiënt voor de veranderlijke belastingen i ([1] §4.2.4)

$Q_{k,i}$ = Karakteristieke waarde van gelijktijdig optredende veranderlijke belasting i

De combinatiecoëfficiënt $\psi_{E,i}$ moet worden berekend volgens, [1] §4.2.4:

$$\psi_{E,i} = \varphi * \psi_{2,i}$$

waarin:

φ = Zie onderstaande tabel ([1] Tabel 4.2)

$\psi_{2,i}$ = Combinatiecoëfficiënt voor quasi-permanente waarde van de variabele belasting q_i (NEN-EN 1990:2011 A.1)

De combinatiecoëfficiënten $\psi_{E,i}$ houden rekening met de waarschijnlijkheid dat de belastingen $Q_{k,i}$ gedurende de aardbeving niet over de gehele constructie aanwezig zijn. Deze coëfficiënten kunnen ook het effect in rekening brengen van een gereduceerde

deelname van de massa's in beweging van de constructie wegens het niet star met elkaar verbonden zijn van de massa's en de constructie, zie [1] §3.2.4.

Klassen van belaste vloerooppervlakken ^{a)}	Bouwlaag	φ
A tot en met C	Dak	1,0
	Overige bouwlagen (vloeren)	0,6
D tot en met F en archieven		1,0
^{a)} Klasse volgens NEN-EN 1991-1-1 §6.3.1.2		

Belastingscombinaties voor aardbevingsontwerpsituaties

De rekenwaarde E_d van de belastingeffecten in de seismische ontwerpsituatie moet worden bepaald volgens, NEN-EN 1990:2011 §6.4.3.4:

$$E_d = \sum G_{k;j} + P + A_{Ed} + \sum \psi_{2;i} * Q_{k;i}$$

Daarbij dient te worden opgemerkt dat de traagheidseffecten van de veranderlijke seismische ontwerpbelastingen worden gereduceerd met factor φ , maar dat in bovenstaande combinatie de veranderlijke verticale ontwerpbelastingen niet worden gereduceerd met factor φ . Hier dient in het rekenmodel rekening mee te worden gehouden.

Stap 9: Bepaal correctiefactor λ

De correctiefactor $\lambda = 0,85$ indien $T_1 < 2 * T_c$ en het gebouw meer dan twee bouwlagen heeft, en $\lambda = 0,85$ in andere gevallen, zie [1] §4.3.3.2.2.

De correctiefactor λ brengt in rekening dat voor gebouwen met ten minste drie bouwlagen en translatievrijheidsgraden in elke horizontale richting, de effectieve geactiveerde massa van de eerste (fundamentele) trilvorm gemiddeld 15% kleiner is dan de totale massa van het gebouw.

Stap 10: Bepaal afschuifkracht t.p.v. fundering F_b

De afschuifkracht als gevolg van de seismische belasting ter plaatse van de fundering F_b moet voor de twee beschouwde horizontale richtingen zijn bepaald met, [1] 4.3.3.2.2:

$$F_b = S_d(T_1) * m * \lambda$$

waarin:

$S_d(T_1)$ = Waarde van het ontwerpresponspectrum bij trillingsperiode T_1 , zoals bepaald in Stap 7

m = Totale massa van het gebouw, zoals bepaald in Stap 8

λ = Correctiefactor, zoals bepaald in Stap 9

Stap 11: Bepaal verdeling van de horizontale seismische krachten F_i

De verdeling van de horizontale seismische krachten moet zijn bepaald door horizontale krachten F_i aan te laten grijpen op alle bouwlagen in de twee te beschouwen richtingen. Indien de fundamentele trilvorm is benaderd door lineair toenemende horizontale verplaatsingen over de hoogte van het gebouw, dan mogen de horizontale krachten F_i gelijk zijn genomen aan, [1] §4.3.3.2.3:

$$F_i = F_b * \frac{z_i * m_i}{\sum_{j=1}^n z_j * m_j}$$

waarin:

F_i = Horizontale kracht aangrijpend op bouwlaag i

F_b = Seismische afschuifkracht t.p.v. de fundering, zoals bepaald in Stap 10

z_i = Afstand van de vloer met de massa m_i t.o.v. het niveau van aangrijpen van de seismische belasting (maaiveld)

z_j = Afstand van de vloer met de massa m_j t.o.v. het niveau van aangrijpen van de seismische belasting (maaiveld), daaronder ook inbegrepen m_i

m_i, m_j = Massa's van de bouwlagen, in overeenstemming met [1] §3.2.4

n = Aantal bouwlagen boven de fundering of de bovenzijde van een als star te beschouwen kelder of een star met de fundering verbonden beganegrondvloer

$j = 1$ = Eerste vloer boven het maaiveld

De aldus berekende horizontale krachten F_i moeten worden verdeeld over het systeem dat weerstand biedt tegen de zijdelingse belasting, in de veronderstelling dat de vloeren star zijn in hun vlak.

Stap 12: Bepaal bijkomende torsie-effecten

Om rekening te houden met onzekerheden in de locatie van de massa's en in de ruimtelijke variatie van de seismische beweging moet het berekende massamiddelpunt op elke vloer i worden beschouwd als zijnde verplaatst ten opzichte van zijn nominale positie in elke richting met een bijkomstige excentriciteit, zie [1] §4.3.3.2.4.

De bijkomende torsie-effecten mogen volgens [1] en [2] met verschillende methoden worden berekend. De te hanteren methode is afhankelijk van het constructieve model, dat of een vlak model (2D) of een ruimtelijk model (3D) kan zijn, de regelmatigheid in de plattegrond (horizontaal vlak), en gewenste mate van nauwkeurigheid. In Tabel 4 wordt een overzicht gegeven van de verschillende berekeningsmethoden voor bijkomende torsie-effecten, volgens [1] §4.3.3.2.4, [1] §4.3.2, en [1] §4.3.3.3.3.

Tabel 4 Berekeningsmethoden voor bijkomende torsie-effecten

Berekeningsmethode	Model	Wanneer?	Bijkomende torsie-effecten	
Minder nauwkeurige methode [1] §4.3.3.2.4	<u>Ruimtelijk model</u>	Horizontale en verticale regelmatigheid (zijdellingse stijfheid en massa symmetrisch verdeeld)	Belastingeffecten in individuele belasting afdragende elementen (resultierend uit toepassing van bepaalde F_i) vermenigvuldigen met factor δ	$\delta = 1 + 0,6 \frac{x}{L_e}$
	<u>Vlak model</u>	Horizontale en verticale regelmatigheid (zijdellingse stijfheid en massa symmetrisch verdeeld)		$\delta = 1 + 1,2 \frac{x}{L_e}$
Nauwkeurige methode [1] §4.3.2 [1] §4.3.3.3.3	<u>Ruimtelijk model</u>	Alleen verticale regelmatigheid	Bijkomende torsie-effecten bepaald als de omhullende van de effecten die resulteren uit het in rekening brengen van statische belastingen, bestaande uit combinaties van torsiemomenten $M_{a,i}$ om de verticale as van bouwlaag i	$M_{a,i} = e_{a,i} * F_i$ $e_{a,i} = \pm 0,05 \cdot L_i$
	<u>Vlak model</u>	Horizontale en verticale regelmatigheid (zijdellingse stijfheid en massa symmetrisch verdeeld)		$M_{a,i} = e_{a,i} * F_i$ $e_{a,i} = \pm 0,10 \cdot L_i$

- δ = Factor voor bijkomende torsie-effecten
 x = Afstand van het beschouwde element tot het zwaartepunt van het gebouw in de plattegrond, gemeten loodrecht op de richting van de seismische belasting onder beschouwing
 L_e = Afstand tussen de twee verst uit elkaar gelegen horizontale belasting afdragende elementen, gemeten loodrecht op de richting van de seismische belasting onder beschouwing
 $M_{a,i}$ = Torsiemoment dat aangrijpt op bouwlaag i om zijn verticale as
 $e_{a,i}$ = Bijkomende excentriciteit van de massa van bouwlaag i
 F_i = Horizontale kracht werkend op bouwlaag i
 L_i = Vloerafmeting van bouwlaag i loodrecht op de richting van de seismische belasting

5 Constructieve afwegingen

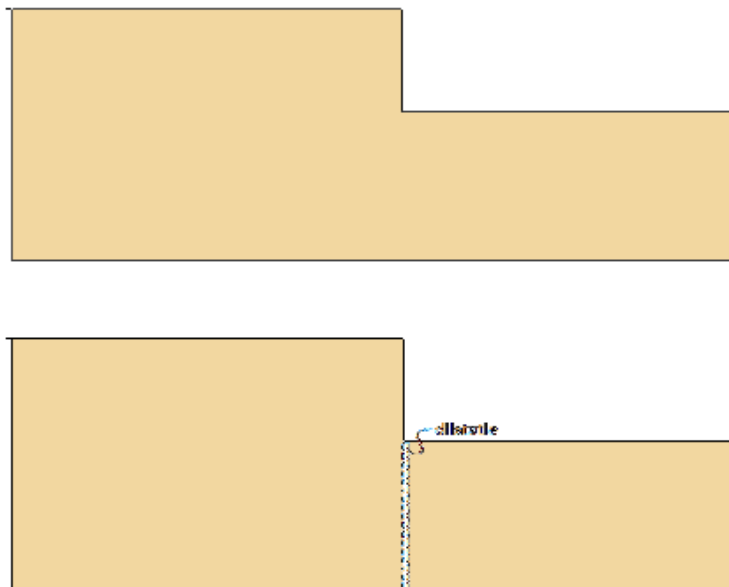
In dit hoofdstuk worden constructieve afwegingen ten behoeve van een aardbevingsbestendig constructief ontwerp gepresenteerd.

Regelmatigheid in horizontaal vlak (plattegrond)

Om de zijdelingse belastingsmethode toe te kunnen passen, dient de constructie regelmatig te zijn in horizontaal vlak (plattegrond). Constructieve maatregelen met betrekking tot regelmatige massaverdeling en stijfheidsverdeling ten behoeve van regelmatigheid in horizontaal vlak zullen worden besproken.

Regelmatische massaverdeling

Een voorwaarde voor regelmatigheid in horizontaal vlak is dat de massaverdeling van het gebouw bij benadering symmetrisch moet zijn in het horizontale vlak ten opzichte van twee onderling loodrechte assen, zie [1] §4.2.3.2 a). De plattegrond in onderstaande afbeelding is asymmetrisch en dus kan de zijdelingse belastingsmethode niet worden toegepast. Dit kan worden opgelost door de plattegrond op te splitsen in twee delen waartussen een dilatatie gemaakt wordt zoals is weergegeven in de onderste figuur.

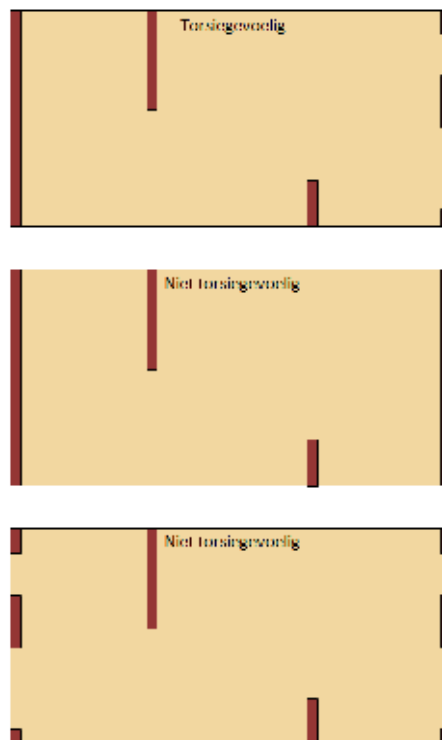


De horizontale en verticale regelmatigheid van de beide delen dient afzonderlijk te worden getoetst om te bepalen of de zijdelingse belastingsmethode mag worden toegepast. Ook dient voor beide delen de zijdelingse belastingsmethode te worden uitgevoerd om de aardbevingsbelastingen en bijbehorende reacties te bepalen in elk van de twee hoofdrichtingen. Tot slot dient de dilatatie te voldoen aan de detailleringregels uit [2].

Regelmatische stijfheidverdeling

Een voorwaarde voor regelmatigheid in horizontaal vlak is een gelijkmatige stijfheidverdeling van de stabiliserende elementen in elk van de twee hoofdrichtingen, waardoor de torsiegevoeligheid van de constructie wordt beperkt, zie [1] §4.2.3.2 e).

In onderstaande afbeelding is te zien dat de bovenste indeling van de plattegrond een ongelijkmatige stijfheidverdeling heeft en dus onregelmatig in horizontaal vlak is. De zijdelingse belastingsmethode mag niet worden toegepast op een constructie met deze plattegrond.



De stijfheidverdeling kan gelijkmatig worden door op de rechteras stijfheid toe te voegen (middelste indeling) of door op de linker as stijfheid weg te nemen (onderste indeling). Met deze maatregel is de constructie regelmatig in horizontaal vlak en dus mag de zijdelingse belastingsmethode toegepast worden.

Demping

Indien de optredende versnellingen als gevolg van een aardbeving te hoog zijn en de constructie niet aangepast kan worden om deze meer aardbevingbestendig te maken dan kan er gekozen worden om dempers toe te passen. Hierbij kan worden gedacht aan in de constructie geïntegreerde dempers en aan externe dempers.

6 Slotwoord

In deze leidraad wordt de meest eenvoudige rekenmethode voor het berekenen van de aardbevingsbelastingen op een constructie toegelicht. De leidraad heeft tot doel een bijdrage te leveren aan het snel doorgronden van de methodiek en de gebruiker op weg te helpen bij het uitwerken van een aardbevingsbestendig bouwwerk.

Voor meer geavanceerde methoden worden verwezen naar NEN-EN 1998 en NPR9998:2015 (december 2015).