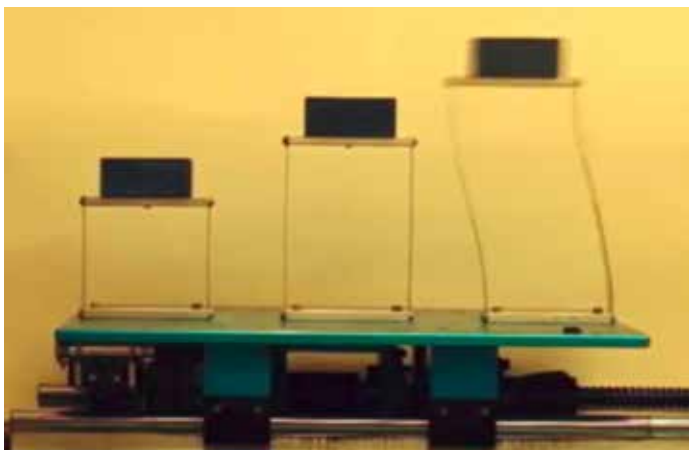
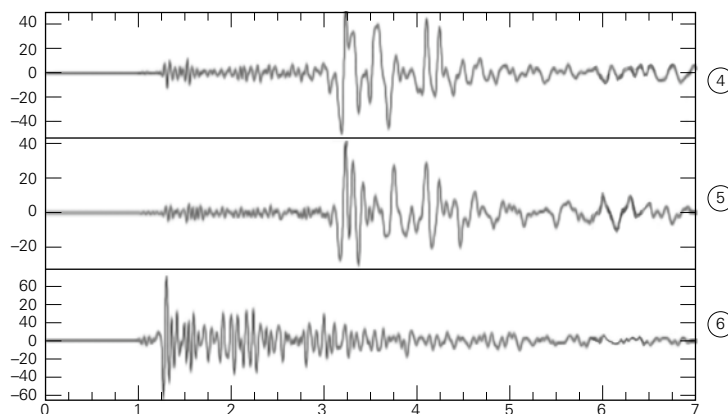


Rekenmethodes voor aardbevingsberekeningen



1. Opslingering van gebouwen in beeld gebracht met een triltafel.



2. Vooral hogere frequenties zijn dominant in de beving.

Niet ieder gebouw reageert hetzelfde op een opgelegde vervorming van een aardbeving. Met name gebouwen waarvan de (eerste of tweede) eigenfrequentie overeenkomt met de dominante frequentie van de beving kunnen grote belastingen naar zich toe trekken. Schets van de vier verschillende rekenmethodes en hun eigenschappen.

ir. R.H.G. Roijackers RO en ir. R.H.J. Bruins

Rudi Roijackers is seismisch expert en Rick Bruins is aardbevingspecialist, beiden bij ABT | Wassenaar Seismisch Advies in Haren.

Het verschil tussen normale 'statische' berekeningen en 'dynamische' aardbevingsberekeningen is aanzienlijk. Bij een statische berekening is de kracht die een gebouw ondervindt niet afhankelijk van de stijfheid van het gebouw zelf. Zo wordt de grootte van de windbelasting op een gebouw enkel bepaald door de omvang van het gebouw, maar niet door de vorm van de windverbanden.

Bij een aardbevingsbelasting is dat anders. Niet ieder gebouw reageert hetzelfde op een opgelegde vervorming van een aardbeving. Het ene gebouw reageert heftiger op een aardbeving dan het andere (afb. 1). Een aardbeving heeft een aantal dominante frequenties, net als een gebouw ook een aantal dominante eigenfre-

quenties heeft. Met name gebouwen waarvan de (eerste of tweede) eigenfrequentie overeenkomt met de dominante frequentie van de beving kunnen grote belastingen naar zich toe trekken. Dit betekent dat niet ieder gebouw even gevoelig is voor de trillingen van de Groningse aardbeving. De aardbevingen in Groningen hebben redelijk specifieke dominante frequenties (afb. 2). Volgens de concept-NPR zijn het met name hogere frequenties die domineren. Dit betekent dan ook dat met name stijve structuren meer last hebben.

Rekenmethodes

Er zijn vier rekenmethodes die gebruikt kunnen worden bij een seismische berekening. De rekenmethodes zijn onder te verdelen in:

- lineair elastische methodes:
 - a. zijdelingse belastingmethode;
 - b. modale responsberekening.
- niet-lineaire methodes:
 - a. niet-lineaire statische (pushover-) berekening;
 - b. niet-lineaire (dynamische) tijds-domeinberekening.

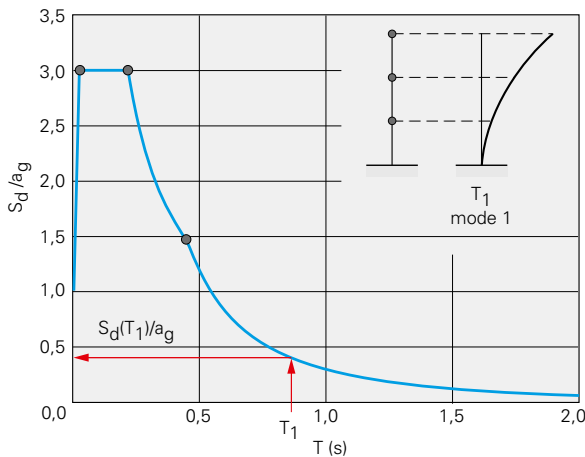
Deze methodes worden hierna toegelicht. Voor een volledige beschrijving van alle eisen en randvoorwaarden wordt verwezen naar hoofdstuk 4 van NEN-EN 1998-1 en van (concept-)NPR 9998.

Zijdelingse belastingmethode (art. 4.3.3.2)

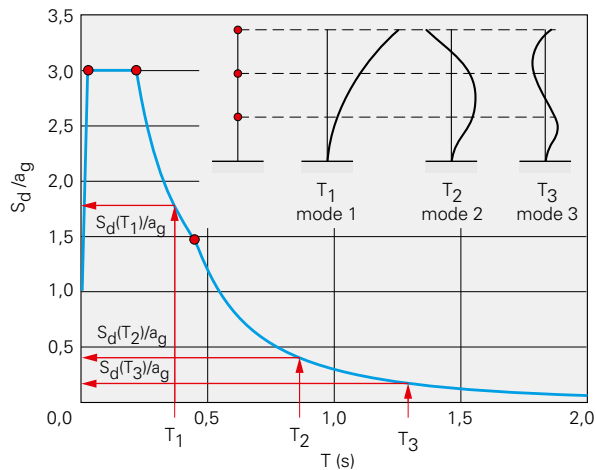
Deze methode is de meest eenvoudige van de vier methodes. Deze mag gebruikt worden bij gebouwen die niet overmatig beïnvloed worden door andere trilvormen. De eerste trilvorm dient dominant te zijn. Dit is voornamelijk het geval bij eenvoudige, regelmatige gebouwen. Bij deze methode wordt de volledige structuur vereenvoudigd tot een één-massa-veersysteem. Met deze rekenmethode wordt de afschuifkracht bij de fundering bepaald. In essentie betreft het de 2^e wet van Newton: $F = m \cdot a$:

- de afschuifkracht F wordt aangeduid als F_p ;
- de versnelling (a) betreft de versnelling van de puntmassa in het één-massa-veersysteem.

Het systeem wordt in beweging gezet door een (piek)grondversnelling. Maar vervolgens wordt het systeem opgeslingerd of gedempt, afhankelijk van de verhouding tussen de eigenfrequentie van het systeem en de dominante frequenties in de aardbeving. Deze opslinging is vastgelegd in het Response Spectrum, behorend bij de Groninger aardbeving (NPR art. 3.2.2.5). De resulterende versnelling (a) wordt verkregen door de respons van het systeem ($S_e(T_1/a_g)$) te vermenigvuldigen met de piekgrondversnelling (PGA) (afb. 2). Aan de formule wordt voor sommige



3. Opzlingering van een één-massa-veersysteem.



4. Modale analyse van een drie-massa-veersysteem.

gebouwen een correctiefactor λ toegevoegd. De grootte van de afschuifkracht wordt derhalve beschreven als:

$$F_b = S_d(T_1) \cdot m \cdot \lambda \quad (4.5)$$

De grootte van de fundamentele trillingsperiode T_1 mag bepaald worden met een eigenwaarde-analyse. Voor eenvoudige systemen zijn deze trillingsperiodes ook in vele handboeken te vinden. Daarnaast kan voor sommige gebouwen gebruik worden gemaakt van de benaderingen zoals die gegeven zijn in NEN-EN 1998-1, art. 4.3.3.2.2.

De zijdelingse belastingmethode is zeer inzichtelijk en kan in sommige gevallen zelfs met de hand worden uitgevoerd. Voor eenvoudige gebouwen geeft de methode een snelle indicatie van de capaciteit, maar in veel gevallen levert deze methode conservatieve resultaten op.

Spectrale modale responsieberekening (art. 4.3.3.3)

Deze methode brengt ook de invloed van hogere trilvormen in beeld. Zo zal een drie-massa-veersysteem drie trilvormen (*modeshapes*) hebben, die ieder een gedeelte van de massa in beweging brengen. Bij een modale responsieberekening wordt de eerder beschreven 2^e wet van Newton toegepast op iedere trilvorm (afb. 4) Dit levert voor iedere trilvorm ook interne krachten en momenten op. De krachten die ontstaan bij de verschillende trilvormen hoeven niet lineair bij elkaar te worden opgeteld. Gezien de verschillende frequenties is het moeilijk voor te stellen dat de maximale dwarskrachten behorend bij de verschillende trilvormen exact op hetzelfde moment worden bereikt. In de meeste gevallen mogen de belastingeffecten worden berekend met SRSS-methode

(Square Root of Sum of Squares). In enkele gevallen geeft dit niet een betrouwbaar resultaat en dient de CQC-methode (Complete Quadratic Combination) te worden gebruikt. Er dienen voldoende trilvormen in rekening te worden gebracht. Zo stelt NPR 9998 dat de som van de effectief geactiveerde massa's van de beschouwde trilvormen ten minste 90% van de totaal in rekening te brengen massa is. Verder dienen alle modi te worden meegenomen die een effectieve massa hebben groter dan 5%.

De berekening is relatief snel. Doordat snel wijzigingen zijn door te voeren, is de berekening goed toepasbaar in een ontwerpproces. Maar de materiaaleigenschappen worden enkel lineair elastisch meegenomen. Het niet-lineaire materiaalgedrag kan wel worden meegenomen door toepassing van de 'q-waarde'. Deze q-waarde geeft de mate van ductiliteit van de constructie aan. Deze methode werkt echter niet altijd inzichtelijk. Het werkelijke bezwijkpatroon is vaak onduidelijk. De meeste geavanceerde rekenpakketten kunnen overweg met een modale responsanalyse, zowel voor 2D-, als voor 3D-constructies. In de uitvoer van de berekening worden de verschillende eigenfrequenties gegeven met de bijbehorende modale massa's. De externe en interne krachten zijn niet altijd per trilvorm op te vragen. Soms kan dat enkel cumulatief over een aantal trilvormen.

Niet-lineaire statische pushover-analyse (art. 4.3.3.4.2)

Bij een niet-lineaire statische pushover-analyse wordt een structuur belast tot bezwijken. Hierbij wordt de belasting zo aangebracht, dat de structuur vervormt volgens zijn initiële uitbuigingsvorm (eigenmode). In de structuur wordt een 'control node' aangewezen, waarvan het gedrag in beeld wordt gebracht.

De analyse geeft een goed beeld van het werkelijke gedrag van de constructie, inclusief geometrische- en materiaal niet-lineariteiten. De uiteindelijke vervorming van de constructie bij bezwijken kan uitgezet worden tegen de 'target displacement' behorend bij de betreffende aardbeving. De gedachte hierachter is dat de aardbeving een bepaalde vervorming oplegt aan het gebouw. Als het gebouw in staat is deze opgelegde vervorming op te nemen, dan kan het de aardbevingsbelasting weerstaan.

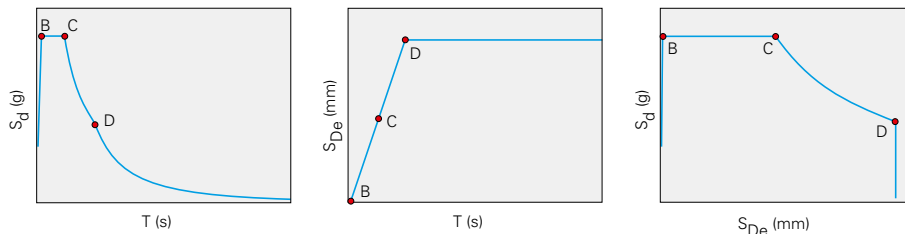
In een elastisch responspectrum (afb. 6) wordt de spectrale versnelling uitgezet tegen de eigenperiode van de constructie. In een vervormings-responspectrum (midden) wordt de spectrale verplaatsing uitgezet tegen de eigenperiode van de constructie. In afbeelding 6, rechts is de spectrale versnelling uitgezet tegen de spectrale verplaatsing. Door de spectrale versnelling te vermenigvuldigen met de massa m krijg je een base shear force F_b , die uitgezet kan worden tegen de verplaatsing S_{De} . Deze kan vergeleken worden met het kracht-verplaatsingsdiagram van een constructie. In afbeelding 5 wordt een dergelijk samengesteld diagram getoond. De blauwe lijn geeft het 'kracht-verplaatsingsdiagram van de aardbeving'. De rode lijn toont het kracht-vervormingsdiagram van de constructie. De groene lijn geeft het geïdealiseerde kracht-vervormingsdiagram van deze constructie, uitgaande van bi-lineair gedrag. De eerste tak is elastisch, de tweede tak is plastisch tot aan het moment van breuk. De structuur dient voldoende te kunnen vervormen tot een 'target displacement', behorend bij de betreffende aardbeving. De pushover-analyse kan uitgevoerd worden bij 2D- en 3D-modelleringen. Het gedrag onder de eerste eigenmode kan eenvoudig

Literatuur

1. *NPR 9998* (Beoordeling van de constructieve veiligheid van een gebouw bij nieuwbouw, Verbouw en afkeuren - Grondslagen voor aardbevingsbelastingen: geïnduceerde aardbevingen), februari 2015.
2. *NEN-EN 1998-1* (Eurocode 8, Ontwerp en berekening van aardbevingsbestendige constructies - Deel 1: Algemene regels, seismische belastingen en regels voor gebouwen), 2005.
3. *NEN-EN 1998-3* (Eurocode 8, Ontwerp en berekening van aardbevingsbestendige constructies - Deel 3: Beoordeling en vernieuwing van gebouwen), 2005.

Tabel 1. Karakterisering van eenvoud van de bouwconstructie.

| regelmaat | | toegelaten vereenvoudiging | | gedragsfactor q (voor lineaire berekeningsmethoden) |
|--------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|---|--|
| horizontaal vlak (plattegrond) | verticaal vlak (verticale doorsnede) | model | lineair elastische analyse-berekeningsmethode | |
| ja | ja | vlak | zijdelingse belasting | referentiewaarde |
| ja | nee | vlak | modaal | verlaagde waarde |
| nee | ja | ruimtelijk | zijdelingse belasting | referentiewaarde |
| nee | nee | ruimtelijk | modaal | verlaagde waarde |



6. Van elastisch responspectrum via vervormings-responscentrum naar versnellings-vervormingsdiagram.

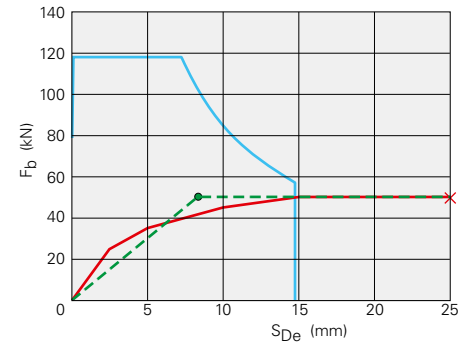
worden bepaald. Bij hogere modi in 3D-constructies is het mogelijk een modale push-over-analyse te doen, maar de berekeningen worden lastiger. Zeker aangezien de resultaten van verschillende modi niet met elkaar kunnen worden gecombineerd.

Niet-lineaire tijdsdomeinanalyse (art. 4.3.3.4.3)

Deze analyse, beter bekend als een *Time History Analysis*, geeft de meest accurate resultaten van alle rekenwijzen. De constructie wordt belast in de tijd met een tijd-versnellings signaal. Als bepaalde frequenties in het signaal overeenkomen met de eigenfrequenties in de constructie, dan treedt opslingering op. Niet alleen de dynamische effecten kunnen in deze berekening worden meegenomen. Ook materiaal- en geometrische niet-lineairiteiten worden beschouwd, wat maakt dat de berekeningen veel rekentijd en computercapaciteit vergen. Eenvoudige sommen kunnen uren duren. De methode is dan ook minder geschikt als ontwerptool. Wel kan de methode worden gebruikt bij toetsing van bestaande constructies of bij toetsing van nieuwe constructies die reeds met de andere, eenvoudigere analyse-metho-

des zijn ontworpen. Als invoer voor de berekening kan een werkelijk gemeten tijdsignaal worden gebruikt, maar voor de Groningse situatie is dat niet raadzaam. De geprognosticeerde bevingen zijn zwaarder dan de geregistreerde bevingen. Bij deze zwaardere bevingen kunnen de frequenties van de trillingen in de beving mogelijk afwijken van de huidig gemeten frequenties. Om dit te ondervangen zijn er tijdsignalen gegenereerd die deze zwaardere bevingen representeren. Om een goed beeld te krijgen zijn vaak berekeningen met meerdere tijdsignalen noodzakelijk. De Time History-rekenmethode is vooral erg interessant voor het modelleren van bestaande gebouwen. De berekening wordt dan niet ingezet in een ontwerpproces, de constructie is immers 'bekend'. De capaciteit van de bestaande en complexe structuren kunnen nauwkeurig in beeld worden gebracht. Zo zijn onder andere enkele rijtjeswoningen, maar ook onderdelen van het Groninger Forum in detail getoetst met een Time History-analyse in het pakket Diana (afb. 7). De belangrijkste nadelen van de methode zijn echter:

- de software is vaak complex en vergt gekwalificeerde gebruikers;



5. Gecombineerde kracht-vervormingsdiagram van de constructie en aardbeving.



7. Time History-berekening op rijtjeswoning.

- het modelleren en analyseren kost vaak meer tijd;
- de berekeningen vergen veel computercapaciteit;
- de modellen vragen veel rekentijd;
- invoer van (materiaal-)parameters is erg belangrijk;
- algemene afspraken over hoe bezwijken in deze analyse moeten worden getoetst ontbreken nog.

Gebruik

In de voorgaande paragrafen is al aangegeven wat de voordelen zijn van de verschillende rekenwijze. Niet alle analyses zijn echter voor alle constructies toepasbaar. NEN-EN 1998-1 geeft in artikel 4.2.3.1 enkele randvoorwaarden waaraan een rekenmodel dient te voldoen. Regelmatiger structuren mogen met eenvoudiger modellen worden berekend (tabel 1).

Bij het beschouwen van bestaande structuren geeft NEN-EN 1998-3 nog aanvullende eisen voor de berekening van metselwerk. In annex C art. C.3 wordt aangegeven dat in sommige gevallen voor de niet-lineaire methoden gekozen moet worden. •