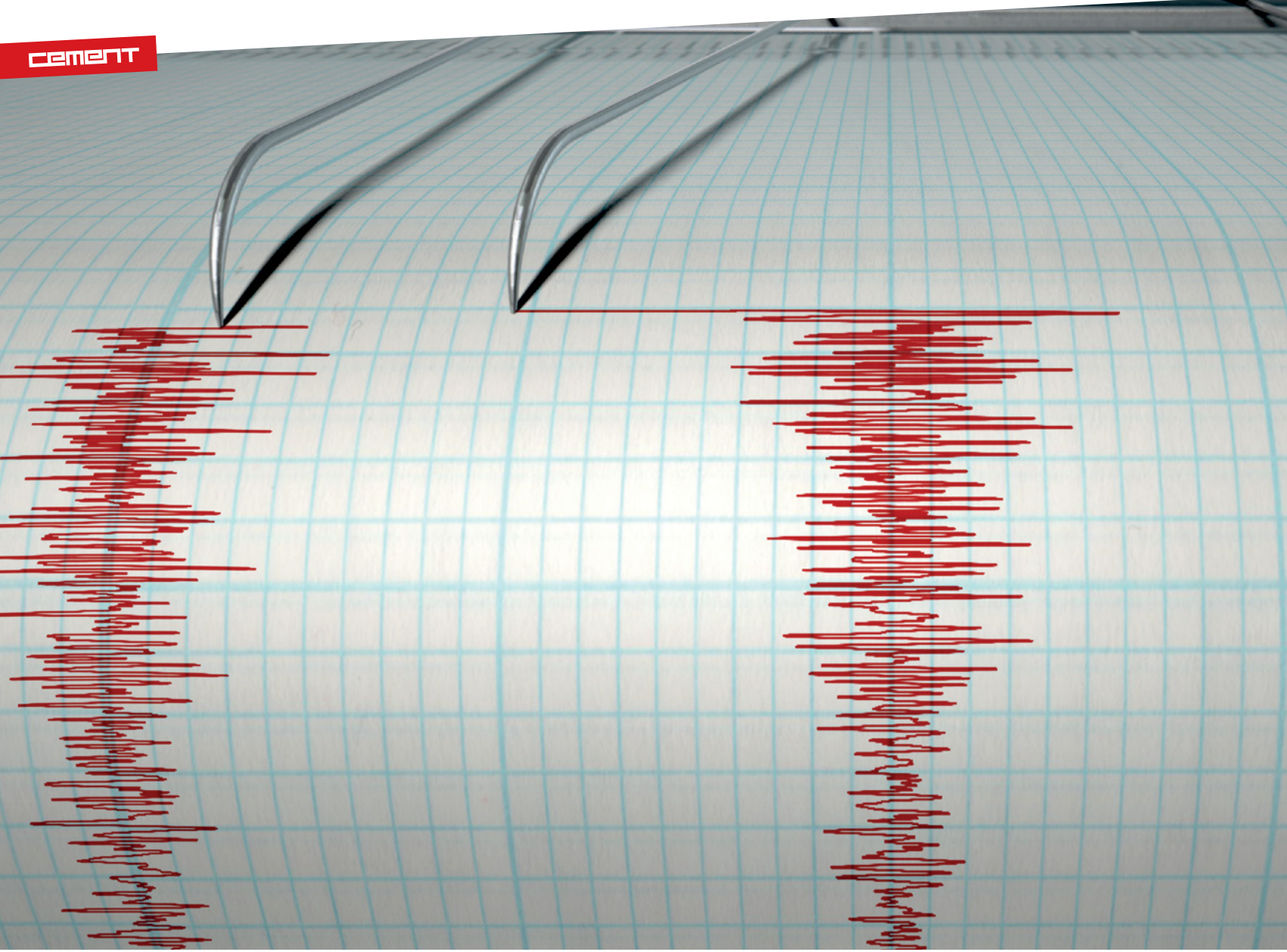




Spoorse onderdoorgang in Gronings aardbevingsgebied getoetst

Onderdoorgangen aardbevings- bestendig?

Meer dan vijftig jaar lang gaswinnen in Groningen heeft de laatste tijd diverse aardbevingen in deze regio tot gevolg gehad. Dit heeft geleid tot uitvoerig onderzoek naar de impact van aardbevingen op de samenleving. Dit onderzoek is echter veelal gericht op bovengrondse constructies. In een afstudeerstudie is gekeken naar de toetsing van een onderdoorgang op aardbevingsbestendigheid.

In het afstudeeronderzoek stond de volgende vraag centraal: 'Hoe kan een op staal gefundeerde spoorse onderdoorgang in het aardbevingsgebied van de provincie Groningen worden getoetst op aardbevingsbestendigheid?' De nadruk lag op het vergelijken van een analytisch model met een volledig dynamisch Plaxis-model. Zeer specifieke aspecten ten aanzien van grondgedrag onder seismische belasting zijn beperkt beschouwd.

Onderzoeksopzet

Om de onderzoeksvraag te beantwoorden, is allereerst een literatuurstudie uitgevoerd naar aardbevingen, onderdoorgangen en de toetsing van onderdoorgangen. Vervolgens is een spoorse onderdoorgang getoetst in een casestudie. Hierbij is uitgegaan van drie constructietypen (fig. 1):

- monolithische constructie (gesloten gedeelte), waarbij het dek momentvast is verbonden met de wanden;
- opgelegde constructie (gesloten gedeelte), waarbij het dek door middel van opleggingen vrij is opgelegd;
- open bakconstructie (open gedeelte).

Als aardbevingssignaal in de casestudie is de aardbeving op 16 augustus 2012 in Huizinge gebruikt. De versnellingen zijn daar met een tijdsstap van 0,005 s vastgelegd in drie richtingen. Het accelerogram dat is gebruikt als input voor de berekeningen is weergegeven in figuur 2.

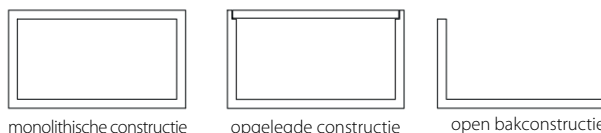
Om de spoorse onderdoorgang te toetsen, is een ontwerp-aardbevingssignaal benodigd. Om een signaal te verkrijgen dat kan worden gebruikt in eindige-elementensoftware, is het opgeschaald naar de ontwerpwaarde van NPR 9998. De maxi-

¹⁾ ing. Rens Pater en ing. David-Jan Smeenge zijn met hun studie 'Aardbevingsbestendigheid van onderdoorgangen' afgestudeerd aan de Hogeschool Windesheim. Zij werden daarbij begeleid door ir. Renger van de Kamp en ir. Jeroen Bonnes van Arcadis en ir. Peter Bosman en Lukas Xu MSc van Hogeschool Windesheim.

ENCI Studieprij 2015

Dit is het eerste artikel in een serie met bijdragen van prijswinnaars van de ENCI Studieprij 2015. De studie die in dit artikel wordt beschreven, ontving de eerste prijs in de categorie Hogescholen. De jury over deze studie: "[...] Een actueel en maatschappelijk gezien relevant onderwerp, waarmee de studenten de lat voor zichzelf zeer hoog hebben gelegd. Na een goede literatuurstudie en een statische berekening van verschillende soorten onderdoorgangen is het effect van aardbevingen berekend [...]. De gevonden resultaten zijn bijzonder goed geëvalueerd en tonen daarmee een hoge mate van vakvolwassenheid aan. Het verslag is zeer goed leesbaar, met een prima gevoel voor de verdeling van de informatie over het rapport en de bijlagen. Al met al een studie op uitzonderlijk hoog niveau waarvoor de jury grote bewondering heeft getoond, met resultaten die bovendien direct toepasbaar zijn voor de praktijk."

Meer informatie op www.cementonline.nl/encistudieprij.



1

male versnelling die is opgetreden ter plaatse van Garsthuizen is $0,67 \text{ m/s}^2$. Deze is opgeschaald naar de ontwerpversnelling van $3,6 \text{ m/s}^2$ (fig. 3).

Het toetsen van een onderdoorgang is in de casestudie op twee manieren uitgevoerd: quasi-statisch en dynamisch.

Quasi-statisch

In de quasi-statische toetsing is de dynamische last als gevolg van een aardbeving geschematiseerd als een extra statische last. Hierbij worden de wanden van een onderdoorgang extra belast als gevolg van verplaatsende grond tegen de wand. Dit is gekwantificeerd door de verschilverplaatsing met de Excel plug-in NERA te berekenen. Deze verschilverplaatsing is omgezet in een kracht op de wand met behulp van de methode Wang. Deze methode bepaalt met behulp van de stijfheid van de wand en de verschilverplaatsing de uitbuiging van de wand. Deze uitbuiging is met behulp van SCIA Engineer omgezet in

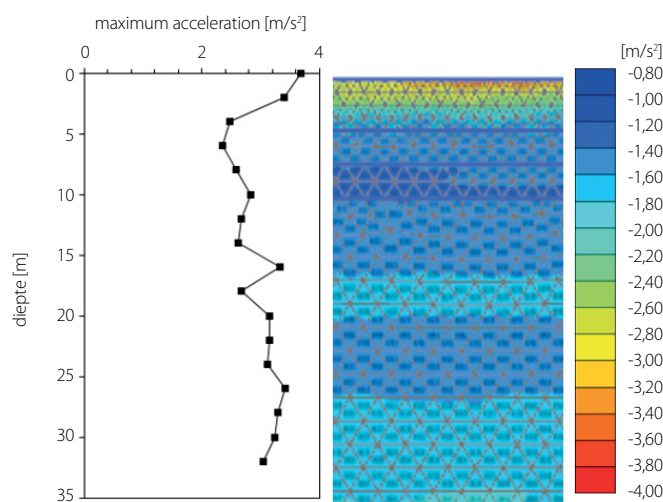
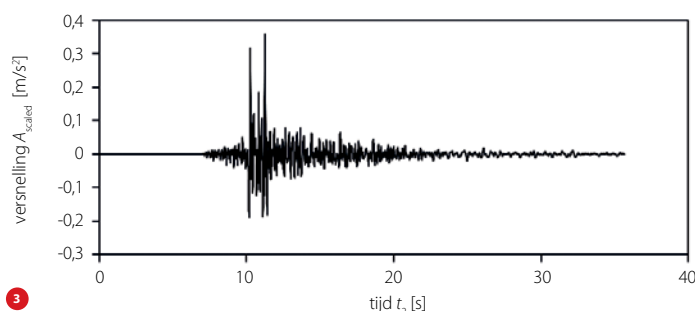
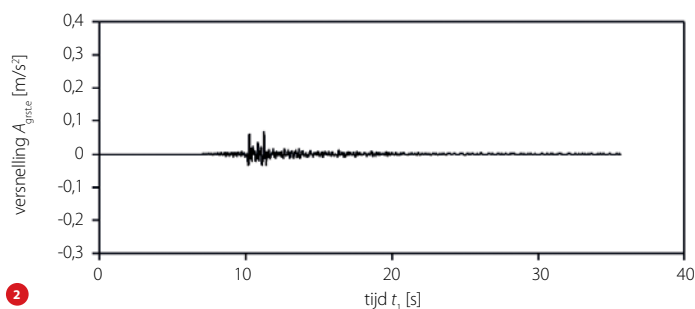
2 Accelerogram meetstation Garsthuizen, aardbeving Huizinge 2012
bron fig. 2 en 3: KNMI

3 Opgeschaald accelerogram meetstation Garsthuizen, aardbeving Huizinge 2012

een kracht op de wand. De bedding is daarbij gemodelleerd als lineaire veer. De invloed van een aardbeving op de beddingsconstante wordt hierin niet meegenomen.

Dynamisch

In de dynamische berekening zijn het grondmodel en de constructie gemodelleerd met het eindige-elementenpro-



4 Versnelling uitgezet tegen de diepte, zandprofiel, resultaten quasi-statisch m.b.v. NERA (a) en resultaten dynamisch m.b.v. Plaxis (b)

gramma Plaxis 2D. Daarna is het ontwerp-aardbevingssignaal op het model gezet. Vervolgens is geanalyseerd wat de uitwerkingen zijn van de trillingen op de constructie.

Statisch

Er is ook een statische berekening uitgevoerd waarin een onderdoorgang is berekend zonder aardbevingsbelasting. Dit is uitgevoerd met Plaxis en met SCIA. Hiermee is inzicht gekregen in de verschillen tussen beide programma's en kan worden bepaald of de combinatie inclusief aardbevingsbelasting maatgevend is.

Resultaten

De uitkomsten van de berekening met de quasi-statische en de dynamische methode zijn met elkaar vergeleken. Het ging hierbij om de siteresponse, de wandverplaatsingen en de momenten. Alleen de resultaten van een onderdoorgang in een zandprofiel zijn weergegeven. Het is binnen deze studie niet gelukt een goed model van een kleiprofiel te construeren in Plaxis.

Siteresponse

Het Plaxis-model (dynamisch) vertoont meer damping dan het NERA-model (quasi-statisch). De versnelling in het NERA-model wisselt tussen de 2,3 en 3,7 m/s², in het Plaxis-model varieert deze van 1,0 tot 3,6 m/s² (fig. 4). De diepten waarop wordt gedempt of juist opgeslingerd, komen overeen; de piek in de versnelling op ongeveer 15 tot 20 m onder maaiveld is in beide modellen duidelijk zichtbaar. Ook het opslingeren aan het maaiveld komt duidelijk naar voren. De versnelling aan het maaiveld is praktisch gelijk, terwijl onder aan het model er 0,8 m/s² verschil zit tussen de twee modellen. Uit een nadere beschouwing is gebleken dat dit vooral werd veroorzaakt door een verschillende schematisering van het dempingsgedrag.

Relatieve verplaatsing

Voor de quasi-statische berekening zijn de relatieve verplaatsingen van de ondergrond die uit NERA voortkomen volgens de methode van Wang omgerekend naar wandverplaatsingen. Voor de dynamische berekening zijn de verplaatsingen bepaald met behulp van Plaxis. Gekeken is naar de verplaatsing van de bovenkant van de wand. Verondersteld wordt dat het grondlichaam de wanden naar binnen laat buigen door het relatieve verplaatsingsverschil. De belasting die dit teweegbrengt op de wand is met behulp van de stijfheid te bepalen. De verplaatsingen en de krachten die op de wand werken, zijn weergegeven in tabel 1.

De dynamische berekening vertoont, in tegenstelling tot de quasi-statische berekening, een verplaatsing van de wand naar

buiten toe (de negatieve waarden in tabel 1). Dit komt doordat de vloer van de opgelegde constructie opbolt als gevolg van de waterdruk en doordat de vloer momentvast is verbonden met de wanden. De wanden drukken hierdoor tegen de grond aan. Als tijdens een aardbeving de grond van de constructie af beweegt, zal de horizontale bedding afnemen en de wand verder naar buiten verplaatsen. In de quasi-statische berekening is de bedding als een lineaire veer geschematiseerd; de invloed van de dynamische belasting is hierin niet meegenomen. De methode Wang is bedoeld om de werkende kracht van een aardbeving op een monolithische tunnelconstructie te bepalen. Voor de opgelegde of open bakconstructie geeft deze methode daarom geen goed beeld van de invloed van de aardbeving op de onderdoorgang.

Moment

Voor de berekening van de momenten in de quasi-statische berekeningen is de berekende verplaatsing omgezet in een kracht met behulp van SCIA Engineer. Voor de dynamische berekeningen is gekeken naar de output vanuit Plaxis. De resultaten van de quasi-statische berekeningen zijn weergegeven in tabel 2, de resultaten van de dynamische berekeningen in tabel 3.

De maximale momenten berekend met SCIA zijn hoger dan berekend met Plaxis. Omdat in een situatie zonder aardbeving SCIA ook conservatiever is dan Plaxis, is gekeken naar de toename van het moment als gevolg van de aardbevingsbelasting.

Bij de monolithische constructie komen de toenames redelijk overeen. Net als bij de relatieve verplaatsingen is dit te verklaren door het feit dat de methode van Wang (gebruikt voor de quasi-statische berekening) is bedoeld voor tunnels en niet voor opgelegde constructies of open bakconstructies.

Praktische toepassing

In de dynamische berekening wordt de werkelijkheid beter benaderd dan in de quasi-statische berekening. In Plaxis is het echter niet mogelijk veiligheidsfactoren mee te nemen en belastingcombinaties in te voeren. Een mogelijke methode om hiermee om te gaan, is door de toename van het moment als gevolg van de aardbevingsbelasting volgens de Plaxis-berekening op te tellen bij de momentenlijn in de statische situatie, bepaald met SCIA. In tabel 4 zijn de resultaten van deze methode weergegeven.

Volgens Eurocode 0 moet wél worden gerekend met variabele belasting in de seismische belastingcombinatie ($\psi = 0,45$). Volgens de nationale bijlage die ten tijde van het onderzoek werd gebruikt, hoeft dit niet ($\psi = 0$). Beide resultaten zijn in tabel 4 weergegeven.

Tabel 1 Verschilverplaatsingen van een onderdoorgang met de quasi-statische en dynamische berekeningsmethode

type constructie	quasi-statisch $\Delta_{\text{constructie}}$ [mm]	dynamisch $\Delta_{\text{constructie}}$ [mm]	verschil in $\Delta_{\text{constructie}}$ [mm]
monolithisch	8	0	8
opgelegd	10	-8	18
open bak	10	-7	17

Tabel 2 Momenten zonder en inclusief aardbevingsbelasting quasi-statisch, zandprofiel

type constructie	moment	moment zonder aardbevingsbelasting [kNm]	maximale moment incl. aardbevingsbelasting [kNm]	toename moment
monolithisch	inklemmingsmoment	581	731	27%
	veldmoment	481	461	-4%
opgelegd	inklemmingsmoment	470	776	65%
	veldmoment	695	592	-15%
open bak	inklemmingsmoment	450	644	43%
	veldmoment	507	449	-11%

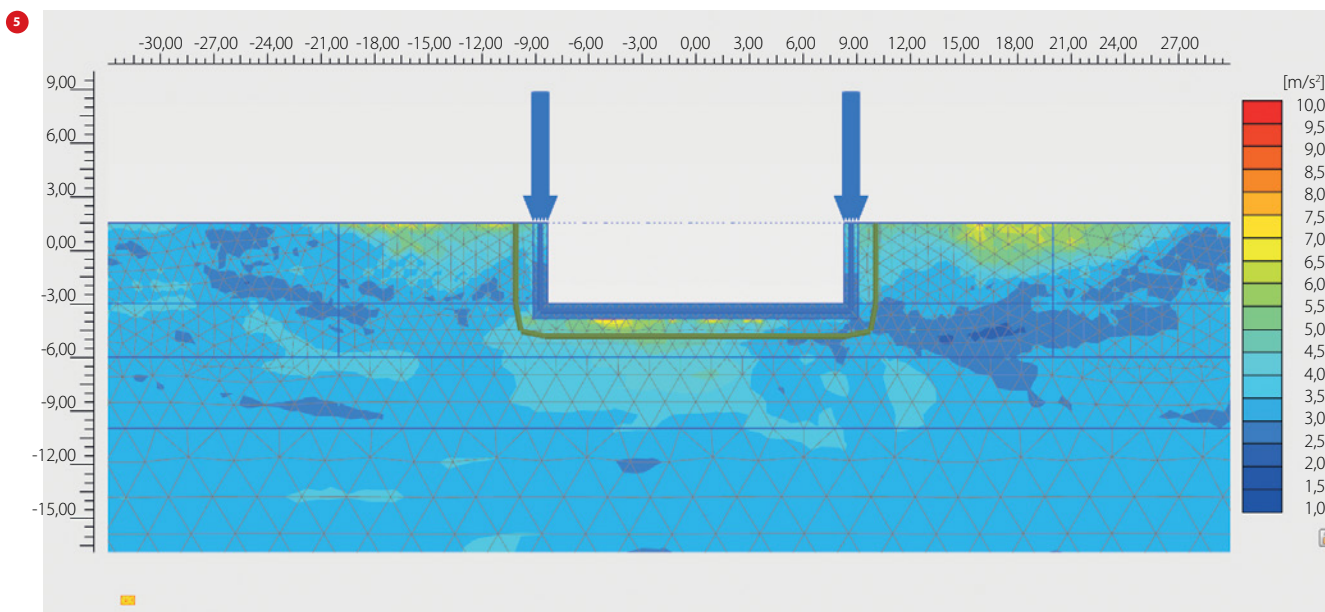
Tabel 3 Momenten zonder en inclusief aardbevingsbelasting dynamisch, zandprofiel

type constructie	moment	moment zonder aardbevingsbelasting [kNm]	maximale moment incl. aardbevingsbelasting [kNm]	toename moment
monolithisch	inklemmingsmoment	486	603	24%
	veldmoment	391	413	6%
opgelegde	inklemmingsmoment	337	486	44%
	veldmoment	509	696	37%
open bak	inklemmingsmoment	299	332	11%
	veldmoment	436	498	14%

Tabel 4 Vergelijking maximaal moment, berekening inclusief aardbevingsbelasting $\psi = 0$ en $\psi = 0,45$

type constructie	moment	moment UGT [kNm]	moment incl. aardbevingsbelasting volgens NB ($\psi = 0$) [kNm]	moment incl. aardbevingsbelasting volgens EC ($\psi = 0,45$) [kNm]
monolithisch	inklemmingsmoment	1341	648	833
	veldmoment	868	478	560
opgelegd	inklemmingsmoment	1363	531	731
	veldmoment	1309	557	648
open bak	inklemmingsmoment	487	483	483
	veldmoment	606	569	569

Uit de resultaten komt naar voren dat de aardbevingsbelasting niet maatgevend is voor de uiterste grenstoestand. Dat komt omdat het hier een spoorse onderdoorgang betreft die is berekend op hoge rem- en aanzetkrachten. Of dit zal gelden voor alle ondergrondse constructies is niet nader onderzocht in deze studie.



Conclusie

Uit de vergelijking van de momenten blijkt dat de belastingscombinatie inclusief aardbevingsbelasting niet maatgevend is voor een onderdoorgang, ongeacht de toetsingsmethode die wordt gebruikt. Wel zijn er grote verschillen tussen beide berekeningsmethoden. De quasi-statische berekening is een vereenvoudiging van de werkelijkheid waarin alleen de krachten als gevolg van een aardbeving worden meegenomen. De quasi-statische berekening neemt niet alle effecten van een aardbeving mee en is daardoor onvolledig. Zo wordt de afname van de bedding als gevolg van een aardbeving in de quasi-statische berekening niet meegenomen, omdat de bedding is vereenvoudigd tot een lineaire veer.

In de dynamische berekening is een analyse uitgevoerd met Plaxis en is zowel het omliggende grondlichaam als de constructie gemodelleerd. De grond-constructie-interactie wordt hierdoor beter meegenomen in de berekening, wat leidt tot een betrouwbaarder resultaat.

Aanbevelingen

Uit dit onderzoek komen de volgende aanbevelingen naar voren:

- Voor ondergrondse constructies is het wenselijk te rekenen met een (aantal) ontwerpaardbevingen in plaats van uitsluitend een piekgrondversnelling zoals aangegeven in NPR 9998. Hiermee zou beter rekening kunnen worden gehouden met de gevarieerde grondopbouw in de provincie Groningen. Het is van belang dat hier verder onderzoek naar wordt gedaan en deze wordt opgesteld en/of beschikbaar gesteld.

- Voor het toetsen van een onderdoorgang op aardbevingsbestendigheid is een quasi-statische berekening te beperkt. Het wordt aanbevolen een dynamische berekening uit te voeren met eindige-elementensoftware zoals Plaxis. Door de gevonden toename in krachten en momenten van de aardbevingsbelasting in de dynamische berekening te combineren met de krachten en momenten van een statische berekening, is het mogelijk de maatgevende belastingscombinatie te bepalen.
- De gevonden resultaten in het kleiprofiel staan ter discussie. Deze komen in mindere mate overeen met de resultaten uit literatuur. In vervolgonderzoek wordt aangeraden te kijken naar de demping, de grondparameters en het numerieke model.
- Op basis van de nationale bijlage van NEN-EN 1990 mag voor de variabele belasting van weg- en spoorverkeer tijdens een aardbeving een ψ van 0 worden toegepast, waardoor de treinbelasting niet hoeft te worden meegenomen. Maar naar verwachting heeft de massa van een trein een grote invloed op de onderdoorgang als die onderhevig is aan een aardbeving. Aangeraden wordt deze factor te heroverwegen en bijvoorbeeld Eurocode 0 hierin te volgen. ☒

LITERATUUR

- 1 ASCII tabellen Huizinge. De Bilt, Utrecht, Nederland, KNMI, 16 augustus, 2012.
- 2 Kramer, L., Geotechnical Earthquake Engineering. Upper Saddle River, Verenigde staten, Prentice Hall, 1996.