

Aardbevingsbestendig ontwerpen van prefab betonconstructies

Hoe kan men bij het ontwerp van prefab betonconstructies een gepast veiligheidsniveau bereiken om zich te behoeden voor aardbeving? Een aardbeving is namelijk een uitzonderlijk belastinggeval. Het onderscheidt zich door de grote horizontale impact, die deze van wind ver kan overstijgen. Bovendien gaat het om een dynamische inwerking, terwijl wind meestal als statisch beschouwd wordt. De uit te voeren toetsing vraagt geen uitzonderlijke inzichten. Men moet wel over de juiste ontwerpmethodiek en software tools beschikken. In dit artikel bieden we een korte inleiding.

NORMERING

In het verleden zijn er in heel België regelmatig aardbevingen waarneembaar geweest met actieve breuklijnen in Luik, Henegouwen, Waals-Brabant en Noord-Limburg. Voor wat seismisch ontwerpen betreft was er tot nog toe sprake van enige onwetendheid. ►

Conception parasismique des constructions en béton préfabriqué

Comment la conception de constructions en béton préfabriqué peut-elle atteindre un niveau de protection suffisant contre les séismes? Un séisme est un événement exceptionnel. Il se distingue par un impact horizontal important pouvant excéder nettement celui du vent. En outre, il s'agit d'une action dynamique, tandis que le vent est généralement considéré comme statique. Les vérifications requises n'exigent pas de connaissances exceptionnelles. Il faut toutefois disposer de la méthode de conception et des outils logiciels adéquats. Nous proposons une brève introduction dans le présent article.



In 1983 vond in Luik nog een aardbeving plaats met een sterkte van 5,0 op de schaal van Richter.

En 1983, à eu lieu à Liège un tremblement de terre avec une force de 5,0 sur l'échelle de Richter.

NORMALISATION

Dans le passé, de très nombreux séismes ont été régulièrement ressentis dans toute la Belgique avec des lignes de faille actives dans les provinces de Liège, du Hainaut et du Brabant flamand et dans le nord du Limbourg.

La conception parasismique restait cependant jusqu'il y a peu assez méconnue en Belgique. En octobre 2011, un changement est survenu avec la parution des annexes nationales de la série Eurocode 8 (NBN EN 1998-X – Calcul des structures pour leur résistance aux séismes). ►

- In oktober 2011 kwam daar verandering in met het verschijnen van de nationale bijlagen bij de Eurocode 8 reeks (NBN EN 1998-X – ontwerp en berekening van aardbevingsbestendig constructies).

Sinds het verschijnen van de laatste nationale bijlage bij de NBN EN 1990 (grondslag voor het constructief ontwerp - januari 2013) kan elke constructie in België getoetst worden aan de mogelijke impact van een aardbeving. Gebouwen met een bouw aanvraag na die datum zouden systematisch moeten getoetst worden. Dat is geen wettelijke verplichting maar een niet zomaar te negeren aanbeveling.

Het grote voordeel van de NBN EN 1998-1 is dat er specifiek aandacht wordt besteed aan het geven van geprefabriceerde betonnen gebouwen met hun typische verbindingdetails. Andere codes zoals de Amerikaanse ACI

*Genesis Braine l'Alleud voor AXA, prefab
gevelkaders en welfsels (Echo)*
*Genesis Braine l'Alleud pour Axa, cadres de
façade en prefa et hourdis (Echo)*



- Depuis la parution de la dernière annexe nationale de la norme NBN EN 1990 (Bases de calcul des structures – janvier 2013), chaque construction en Belgique peut être évaluée relativement à l'impact potentiel d'un séisme. Les bâtiments faisant l'objet d'une demande de permis de bâtir après cette date devraient en principe être systématiquement évalués. Ce n'est pas une obligation légale, mais une recommandation à ne pas négliger.

Le grand avantage de la norme NBN EN 1998-1 est l'attention spécifique portée aux bâtiments en béton préfabriqué et à leurs détails d'assemblage spécifiques. D'autres codes tels que l'ACI 318 (2014) aux États-Unis autorisent la préfabrication, mais exigent pour leur part que les assemblages puissent développer les mêmes capacités que ceux en béton

318 (2014) laten wel prefab toe, maar eisen dan weer dat de verbindingen dezelfde capaciteiten kunnen ontwikkelen als deze in ter plaatse gestort beton. Dit euvel vinden we ook terug in andere normen.

Wat wordt volgens de norm als een prefabconstructie beschouwd? Van de onderstaande lijst, ontleend uit de norm, zijn enkel situaties (2) en (3) prefab in de Belgische betekenis van het woord.

1. Prefabgebouw met ter plaatse gestorte knopen zodat de samengestelde constructie reageert als een ter plaatse gestort gebouw;

coulé sur place. On trouve cet inconvénient aussi dans d'autres codes que le code européen.

Qu'est-ce qu'une construction préfabriquée selon la norme? D'après la liste suivante, reprise de la norme sismique, seule les situations (2) et (3) correspondent vraiment aux systèmes préfabriqués tels qu'on les entend habituellement en Belgique.

1. Un bâtiment préfabriqué avec des nœuds coulés sur place de sorte que la construction assemblée réagit comme un bâtiment coulé sur place;

2. Prefabonderdelen in combinatie met ter plaatse gestorte kernen of afschuiwingswanden als zogenaamde primaire elementen (zie verder);
3. Volledig geprefabriceerd gebouw zoals een industriële loods of gebouwen opgetrokken met prefabkaders zonder ter plaatse gestorte kernen.

ONTWERPASPecten

De te nemen maatregelen hebben hoofdzakelijk invloed op de zogenaamde primaire elementen, die specifiek bijdragen tot de weerstand tegen seismische belastingen. Alle andere elementen worden aangeduid als secundair en zijn niet onderworpen aan Eurocode 8 (EC8). Volgens de definitie

2. Des éléments préfabriqués en combinaison avec des nœuds coulés sur place ou des voiles de cisaillement comme éléments dits primaires (cf. infra);
3. Bâtiment entièrement préfabriqué tel qu'un entrepôt industriel ou des bâtiments érigés au moyen de cadres préfabriqués sans nœuds coulés sur place.

ASPECTS DE CONCEPTION

Les mesures à prendre influent principalement sur les éléments dits primaires, qui contribuent spécifiquement à la résistance contre les charges

van deze norm mag de totale bijdrage in laterale stijfheid van alle secundaire elementen niet groter zijn dan 15% van de primaire seismische elementen. Zo zal een trappenkern met een binnenafmeting van $4 \times 4 \text{ m}^2$ (wanddikte 0,2 m) primair blijven tot en met 249 kolommen van $0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$ /trappenkern. Meestal zijn de eisen dan ook enkel van toepassing op de trappen en liftkernen. De secundaire elementen en hun verbindingen moeten toch gedetailleerd worden, zodanig dat zij de seismische beweging van de primaire structuur kunnen volgen.

Daarnaast zijn er ook een aantal eisen voor niet-constructieve elementen die bij falen aanleiding kunnen geven tot risico's voor personen, de hoofdconstructie of levensnoodzakelijke faciliteiten. Ze zijn terug te vinden in de hierna gedeeltelijk overgenomen tabel 4.4 uit de EC8.

**Tabel 4.4. uit Eurocode 8
Niet constructieve elementen**

Uitkragende borstweringen of sierstukken
Borden en aanplakborden
Schoorstenen, masten en tanks op poten die langs minder dan de helft van hun totale hoogte zich gedragen als ongeschoorde uitkragingen
Binnen- of buitenwanden
Tussenwanden en voorgevels
Schoorstenen, masten en tanks op poten die langs minder dan de helft van de hoogte zich gedragen als ongeschoorde uitkragingen, of die geschoord of getuid zijn aan de constructie ter hoogte van of boven hun massazwaartepunt
Verankerings-elementen voor permanente kasten en boekenrekken die gedragen worden door de vloer
Verankerings-elementen voor valse (hangende) plafonds en bevestigingen voor verlichtingsarmaturen

Alvorens ook maar één berekening uit te voeren is het van belang om enkele algemene principes na te leven, onafhankelijk van het type constructiemateriaal en dus niet specifiek voor prefab beton constructies:

- Constructieve eenvoud
- Uniformiteit, symmetrie en verdeelcapaciteit
- Bi-directionele stijfheid en weerstand
- Torsieweerstand en stijfheid
- Schijfwerking op het niveau van verdiepingen
- Geschikte fundering

Constructies worden verder ingedeeld volgens hun vermogen om energie te verdelen en te absorberen (ook wel 'dissipatievermogen' genoemd). De rangschikking gebeurt aan de hand van ductiliteitsklassen. Ductiliteit is de mate waarin een materiaal plastisch vervormt voor dat het breekt. Constructies met een hoge ductiliteit zijn in

sismiques. Selon la définition de l'Eurocode 8 (EC8), la contribution totale à la rigidité latérale de tous les éléments secondaires ne peut pas excéder 15 % de celle des éléments sismiques primaires.

Un noyau d'escalier de $4 \times 4 \text{ m}^2$ (épaisseur de voile de 0,2 m) reste primaire jusqu'à 249 colonnes de $0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$ /noyau d'escalier. En général, les exigences spécifiques s'appliquent donc uniquement aux noyaux d'escaliers et d'ascenseurs. Les éléments secondaires et leurs assemblages doivent être détaillés, de manière à pouvoir suivre le mouvement sismique de la structure primaire.

Il existe également un certain nombre d'exigences pour les éléments non constructifs qui en cas de défaillances peuvent constituer un risque pour les personnes, pour la structure principale et pour les équipements de première nécessité. On retrouve ces équipements dans le tableau 4.4, partiellement tiré de l'EC8.

**Tableau 4.4 de l'Eurocode 8
Elements non structurals**

Garde-corps ou ornements
Signalisations et panneaux d'affichage
Cheminées, mâts et réservoirs sur poteaux, se comportant en consoles non contreventées sur plus de la moitié de leur hauteur totale
Murs de façade et intermédiaires
Cloisons et façades
Cheminées, mâts et réservoirs sur poteaux, se comportant en consoles non contreventées sur moins de la moitié de leur hauteur totale, ou contreventées ou haubanées à la structure au niveau ou au-dessus de leur centre de gravité
Éléments de fixations des meubles lourds et des bibliothèques supportés par les planchers
Éléments de fixations des faux-plafonds et autres dispositifs légers de fixation.

Avant d'effectuer le moindre calcul, il est important de respecter quelques principes généraux, indépendants du

type de matériau de construction et non spécifiques donc aux constructions en béton préfabriqué :

- Simplicité constructive
- Uniformité, symétrie et redondance
- Rigidité et résistance bidirectionnelles
- Résistance et rigidité à la torsion
- Action des diaphragmes au niveau des étages
- Fondation adéquate

Les constructions sont en outre subdivisées en fonction de leur capacité à répartir et absorber l'énergie (que l'on appelle aussi « capacité de dissipation »). La classification s'effectue au moyen du concept de classe de ductilité (La ductilité est la capacité d'un matériau à se déformer de manière plastique avant de rompre; les constructions présentant une haute ductilité sont capables d'absorber une quantité d'énergie importante). Lorsque la conception est conforme à la norme « béton » NBN EN 1992-1-1 ordinaire,

▶ staat veel energie te absorberen. Wanneer het ontwerp voldoet aan de eisen van de gewone 'beton'-norm NBN EN 1992-1-1, wordt verondersteld dat het sowieso voldoet aan de eisen voor een lage ductiliteit (DCL = ductility class low). Meestal is dat voor België voldoende en zijn er geen bijkomende ontwerpmaatregelen te treffen. De enige specifieke maatregel is dat de wapening van klasse B of C dient te zijn (BE500S of ook BE500TS als meest courante).

Naast de lage ductiliteit heb je ook nog gebouwen die kunnen voldoen aan middelmatige (DCM) en hoge ductiliteit (DCH) door middel van bijkomende maatregelen aan die van Eurocode 2.

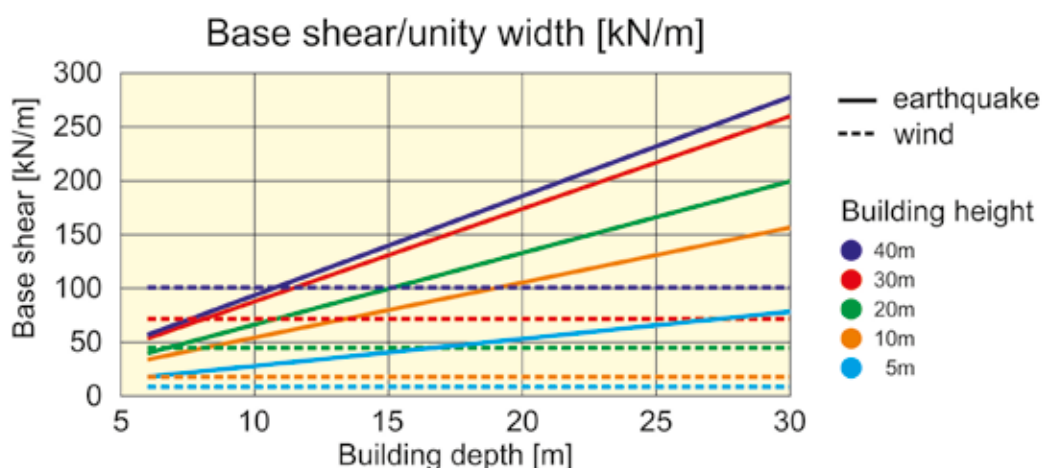
Om tot een economisch ontwerp en detaillering te komen, beperkt men zich in België doorgaans tot de klasse DCM en een gedragsfactor q van 1,5. Die factor laat toe om een ingewikkelde niet-lineaire analyse te vervangen door een eenvoudige lineaire berekening. De dissipatieve respons wordt immers gevonden door de elastische respons te delen door deze factor.

Verder zijn er voor de verschillende mogelijke elementen standaard ontwerp- en detailleringsregels beschikbaar die gaan over eenvoudige geometrische randvoorwaarden (bv een aanbevolen dikte/verdiepingshoogte verhouding voor een wand) naar positie van wapening, beugelvormen en

dergelijke. Deze zijn uiteraard terug te vinden in de normering.

SEISMISCHE BELASTING.

Om het effect van een aardbeving in rekening te brengen werd vaak gewerkt met de 'equivalente laterale kracht methode'. Daarbij wordt een deel van het (verticaal werkende) eigen gewicht rekenkundig horizontaal op het gebouw geplaatst. Op die manier idealiseert men de inertiekrachten die optreden gedurende de aardbeving en kan men het ontwerp vervolgens aanpassen. Het grote voordeel van deze methode bestaat erin dat een handberekening toelaat een eerste inschatting te maken en dat men gevoel houdt met de optredende krachten.



▶ les structures sont considérées comme en classe de ductilité limitée (DCL = ductility class low). En général, c'est suffisant pour la Belgique et il ne faut pas prendre de mesures de conception supplémentaires. Seule mesure spécifique: l'armature doit être de classe B ou C (BE500S ou aussi BE500TS plus couramment).

Outre la ductilité faible, il existe aussi des bâtiments qui peuvent répondre à une ductilité moyenne (DCM) et à une ductilité haute (DCH), moyennant des mesures additionnelles à celle de l'Eurocode 2.

Pour une économie tant au niveau de la conception générale que des dispositions constructives, on se limite pour

les applications standard en Belgique à la classe DCM, et un facteur de comportement q égale à 1,5. Ce facteur de comportement permet de remplacer une analyse complexe non-linéaire par une analyse linéaire plutôt simple. Si on divise la réponse élastique par ce facteur, on retrouve la réponse plastique (limitée)

En outre, il existe pour les différents types d'éléments possibles des règles de conception et des dispositions constructives standard qui définissent des critères géométriques simples (p. ex. un rapport épaisseur/hauteur de niveau recommandé pour un voile) ou des règles sur la position de l'armature, les formes d'étriers et autres. On les retrouve naturellement dans les normes.

EFFORT SISMIQUE

Pour calculer l'effet d'un séisme, on travaille souvent avec la « méthode de force latérale équivalente ». Pour ce faire, une fraction du poids propre est appliquée horizontalement sur le bâtiment. De cette manière, on idéalise les forces d'inertie qui surviennent durant le séisme et l'on peut ensuite analyser la structure et dimensionner les éléments en conséquence. Le grand avantage de cette méthode? Elle permet d'effectuer une première estimation simple et de se faire une idée des forces actives.

Moyennant un certain nombre de simplifications, il est possible, pour des bâtiments jusqu'à 40 m de hauteur, de se représenter l'influence du vent par rapport à celle d'un séisme.

Mits een aantal vereenvoudigingen kan men voor gebouwen tot 40 m hoog een beeld krijgen van de invloed van de wind in verhouding tot deze van een aardbeving.

In onderstaande figuur geeft de x-as de gebouwdiepte weer, de y-as de dwarskracht/m breedte. De volle lijnen geven de kracht weer ten gevolge van een aardbeving met grondtype D in seismische zone 1 en de stippellijnen de kracht ten gevolge van wind met een veiligheid 1,5, $cf = 1,3$, basis snelheid van 25 m/s en terreincategorie II. Dit alles voor 5 verschillende gebouwhoogten van 5 tot 40 m boven maaiveld.

Dans la figure ci-dessus, l'axe x indique la longueur du bâtiment et l'axe y la force de cisaillement par mètre de largeur. Les lignes continues indiquent la force résultant d'un séisme pour un sol de type D dans une zone sismique 1 et les lignes pointillées indiquent la force du vent avec une sécurité de 1,5, $cf = 1,3$, une vitesse de base de 25 m/s et une catégorie de terrain II, le tout pour 5 hauteurs de bâtiments de 5 à 40 m au-dessus du sol naturel.

La capacité de calcul dont nous disposons à l'heure actuelle permet de considérer plusieurs périodes propres ainsi que leur influence respective (= Modal Response Spectrum Analysis – MRSA). Le point critique réside ici cependant dans une sélection des modes concernés, pour limiter le temps de calcul et obtenir quand même des résultats suffisamment précis. Grace à cette méthode, nous pouvons

Door de beschikbare rekenkracht kan men meerdere eigenperiodes en de onderlinge invloed beschouwen (= multiple respons spectrum analyse MRSA). Het kritieke punt daarbij is evenwel de selectie van de betrokken modes om de rekentijd te beperken en toch voldoende nauwkeurige resultaten te bekomen.

Dankzij deze methode kunnen ingewikkelde structuren doorgerekend worden en krijgt de ontwerper meer vrijheid.

Om het ontwerpspectrum te bepalen zijn er vier termen van belang;

- het type respons spectrum, in België is dit type 2, zie NBN EN 1998-1 ANB

Belangrijkheidsklasse	Belangrijkheidsfactor γ_1	Omschrijving
I	0,8	Gebouwen met minder belang voor publieke veiligheid, bvb. agrarisch doeleinde of gewoonlijk niet bezet.
II	1,0	Gewone gebouwen niet in de andere categorieën < 500 pers.
III	1,2	Seismische weerstand belangrijk met het oog op bezwijken, scholen, vergaderzalen, handelscentrum, culturele centra, concertalen, tribunes, enz.
IV	1,4	Gebouwen waarin zich gevaarlijke stoffen, producten bevinden, krachtcentrales, ziekenhuizen, kazernes, of andere gebouwen van vitaal belang voor de burgerbescherming

Catégorie d'importance	Coefficient d'importance γ_1	Description
I	0,8	Bâtiments d'importance mineure pour la sécurité des personnes, par exemple, bâtiments agricoles ou généralement inoccupés.
II	1,0	Bâtiments courants n'appartenant pas aux autres catégories < 500 pers.
III	1,2	Bâtiments dont la résistance au séisme est importante compte tenu des conséquences d'un effondrement, par exemple, écoles, salles de réunion, centres commerciaux, institutions culturelles, salles de concert, tribunes, etc.
IV	1,4	Bâtiments abritant des substances ou des produits dangereux, par exemple, centrales électriques, hôpitaux, casernes de pompiers ou autres bâtiments dont l'intégrité est d'une importance vitale pour la protection civile.

analyser des bâtiments beaucoup plus complexes sans limiter la liberté de conception

Pour déterminer le spectre de dimensionnement, quatre facteurs sont importants :

- le type de spectre de réponse, en Belgique il est de type 2, voir NBN EN 1998-1 ANB
- L'accélération de référence du sol a_{gR}

pour le type de sol A (= rocher), voir figure 3.1-ANB NBN EN 1998-1 ANB

- le facteur d'importance γ_1 du bâtiment, voir annexe B NBN EN 1990 ANB et NBN EN 1998-1 ANB
- le coefficient d'amplification de sol S, voir tableau 3.1.-ANB NBN EN 1998-1 ANB et tableau 3.3. du document mère. En Belgique, la description du sol est généralement conforme aux types B à E ou $S = 1,35$ (B) à 1,80 (D).

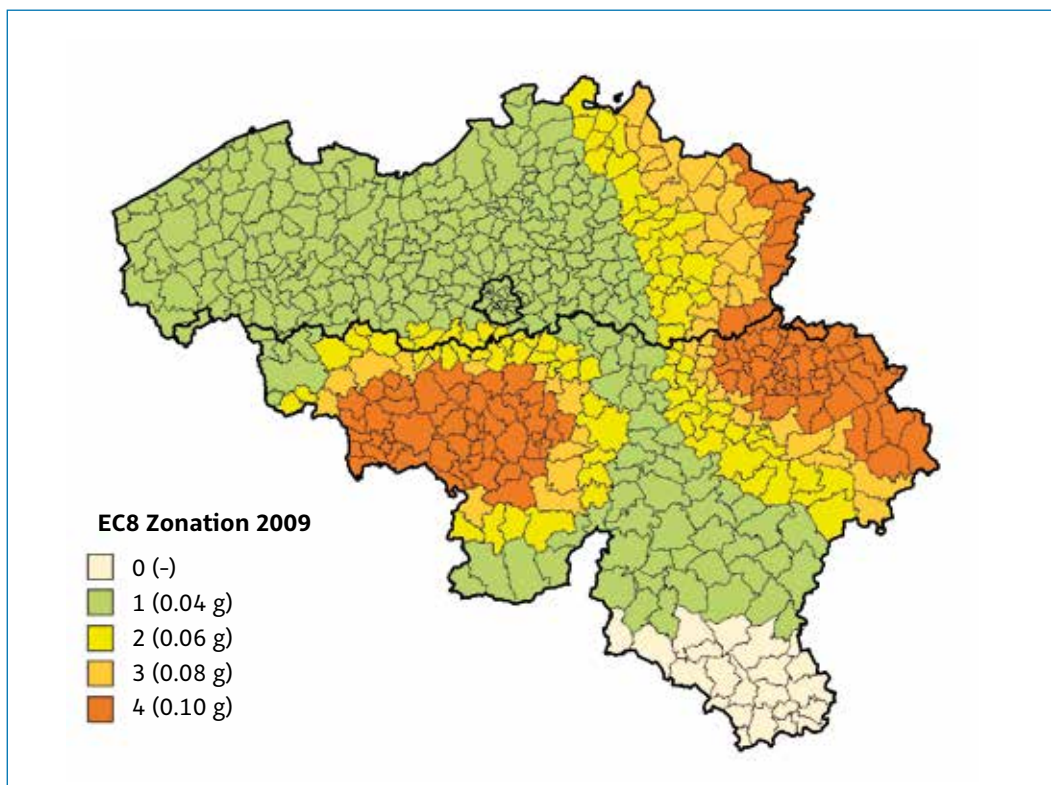
- de referentie grondversnelling a_{gR} voor grondtype A (= rots), zie figuur 3.1-ANB NBN EN 1998-1 ANB
- de belangrijkheidsfactor γ_I van het gebouw, zie bijlage B NBN EN 1990 ANB en NBN EN 1998-1 ANB
- de grondfactor S, zie tabel 3.1.-ANB NBN EN 1998-1 ANB en tabel 3.3. uit het moederdocument. In België voldoet de beschrijving van de ondergrond meestal aan bodemtypes B tot E of S = 1,35 (B) à 1,80 (D).

Als het product van $a_{gR} \cdot \gamma_I \cdot S$ kleiner blijft dan 0,06-g hebben we te maken met zeer lage seismiciteit en zijn de regels voor aardbevingen niet van toepassing. Vanaf 0,10-g is een controle noodzakelijk maar vaak nog niet maatgevend (behoudens wapeningstype). Concreet is dit voor gewone gebouwen pas van toepassing met een $a_{gR} > 0,06\text{-g}$ of enkel in de zones 3 en 4 in de figuur met de referentie grondversnelling. Voor gebouwen met klasse III of IV kan dit evenwel reeds van toepassing zijn voor

een groot deel van België, volgens de grondkwaliteit.

VERBINDINGSDetails.

Typisch voor prefab constructies zijn de verbindingen. Voor gevoelige constructies zijn er een aantal 'droge' mogelijkheden, maar we botsen al gauw op de mechanische beperkingen van dit soort verbindingen. Men zal veelal moeten overgaan tot natte knopen. Eén van de populairste hulpmiddelen is het toepassen van druklagen



Legende?
Légende?

- Si le produit de $a_{gR} \cdot \gamma_I \cdot S$ reste inférieur ou égal à 0,06-g, nous avons affaire à une très faible sismicité et les règles inhérentes aux séismes ne s'appliquent pas. Au-delà, un contrôle est nécessaire, mais il n'est pas souvent déterminant. Concrètement, cela s'applique aux bâtiments courants avec $a_{gR} > 0,06\text{-g}$ ou uniquement dans les zones 3 et 4 de la carte d'aléa. Pour les bâtiments de catégorie d'importance III ou IV, cela peut toutefois déjà être d'application pour une grande partie de la Belgique, suivant la qualité du sol.

DÉTAILS D'ASSEMBLAGE

Les assemblages constituent un point spécifique des constructions préfabriquées. Pour les constructions sensibles, il existe un certain nombre de possibilités «sèches», mais l'on se heurte rapidement aux limites mécaniques de ce type d'assemblage. Il faudra le plus souvent passer à des nœuds humides. L'un des dispositifs les plus populaires est la mise en œuvre de dalles de compression sur les éléments de plancher pour pouvoir créer un diaphragme qui assure un transfert des charges horizontales aux éléments rigides verticaux

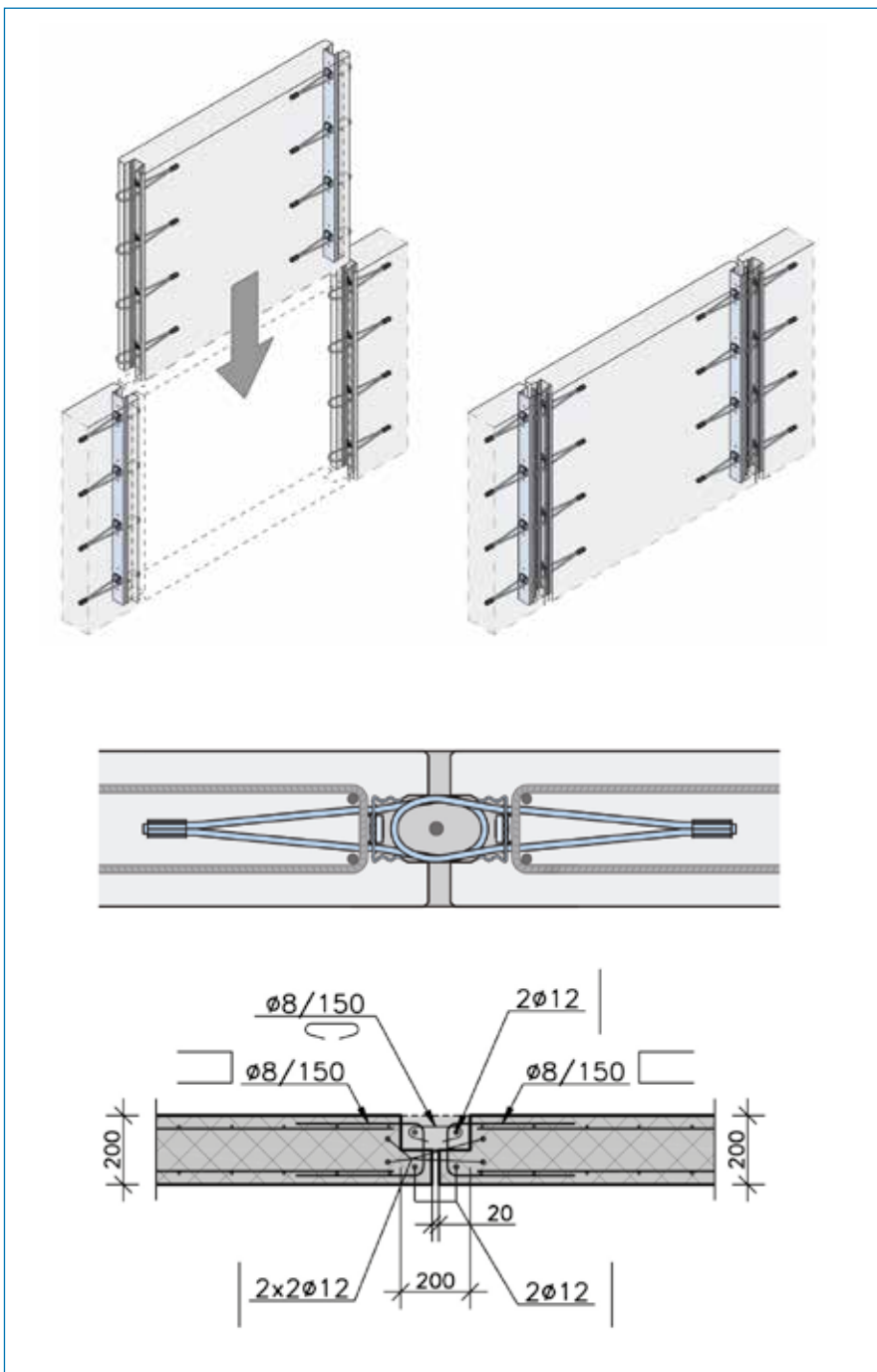
(murs de contreventement). Cette couche de compression doit présenter une épaisseur d'au moins 50 mm. L'armature doit également être adaptée. (Par comparaison, la dalle doit tre de 70 mm lorsqu'elle est entièrement coulée sur place). Les éléments rigides doivent être présents dans deux directions orthogonales. La déformation horizontale due à une charge sismique dans une direction est limitée par les éléments muraux dans cette même direction. Elle implique également des efforts hors-plan sur les murs perpendiculaires à la direction du séisme.

op vloerelementen om een diafragma te kunnen vormen die de horizontale lastoverdracht naar stijve elementen (shear walls) verzekeren. Deze druklaag moet algemeen minimaal 50 mm dik zijn. De wapening moet ook aangepast zijn, om in alle toepassingen te kunnen gebruiken (waar dit voor ter plaatse gestort zelfs 70 mm dient te zijn). De stijve elementen dienen steeds in twee orthogonale richtingen aanwezig te zijn. De uitwijking ten gevolge van een seismische belasting in één richting

wordt beperkt door wandelementen in dezelfde richting. Ze belast wel de wanden die er loodrecht op staan.

Er zijn behoorlijk wat verbindingen op de markt (bijvoorbeeld Loop Boxen, Halfen) die perfect combineerbaar zijn met een aardbevingsbestendig ontwerp. In het ideale geval worden de geometrische kenmerken omgezet naar mechanische randvoorwaarden in een rekenmodel. Dit is niet anders dan bij een gewone berekening.

Er zijn heel wat redenen waarom het wenselijk is om zonder druklaag te werken. De belangrijkste reden is wellicht het feit dat een druklaag een bijkomende belasting is die bij een aardbeving bijkomende krachten genereert. Ook hiervoor zijn er oplossingen beschikbaar, via vloerelementen die voorzien zijn van een sinusvormig langprofiel. Mits een goede detaillering van de dwarse kettingen, heeft deze voeg een hogere dwarskrachtcapaciteit en betere absorberende capaciteiten.



Eenvoudige geïndustrialiseerde verbinding (Halfen) versus arbeidsintensieve verbinding (Project Ecuador)

Assemblages industrialisés simples (Halfen) versus assemblages qui nécessitent l'emploi d'une forte main-d'œuvre (projet Ecuador).

Il existe de nombreux assemblages sur le marché (par exemple, les Loop Box, Halfen) qui peuvent être combinés à la perfection avec une conception parasismique. En général, il suffit de définir un modèle mécanique approprié des connexions en fonction des caractéristiques géométriques des assemblages puis d'effectuer un calcul ordinaire.

Il existe de nombreuses raisons pour lesquelles il peut être souhaitable de travailler sans couche de compression. Le fait qu'une couche de compression constitue une masse supplémentaire qui génèrera des forces d'inertie supplémentaires lors d'un séisme est probablement la principale de ces raisons.

► BEREKENINGSSCHEMA

Het hele aardbevingsontwerp is gebaseerd op een aantal principes: zwakkere horizontale elementen, waarin energie zich moet verdelen enerzijds, en sterke koppelingen met verticale componenten zoals de kolommen en wanden. Hierin zit het belang van een zo juist mogelijke theoretische benadering van de verbinding. Door ze juist te dimensioneren zetten we de nodige oversterkte op de juiste plaats.

Het werk van de ingenieur wordt in praktijk enkel uitgebreid met een extra analyse van dezelfde structuur. In klassieke toepassingen wordt een betonstructuur elastisch berekend met de

stijfheden van de ongescheurde en ongewapende betonsecties. Hieruit volgen verplaatsingen en krachten, waarbij de aan trek onderworpen zones van (buig)trekwapening moeten voorzien te worden.

Bij aardbevingen bestaat de algemene procedure erin de uitwijking van de structuur te bepalen voor een aantal eigenperiodes, om vervolgens via de hoger aangehaalde gedragsfactor q tot de bijhorende krachten te komen.

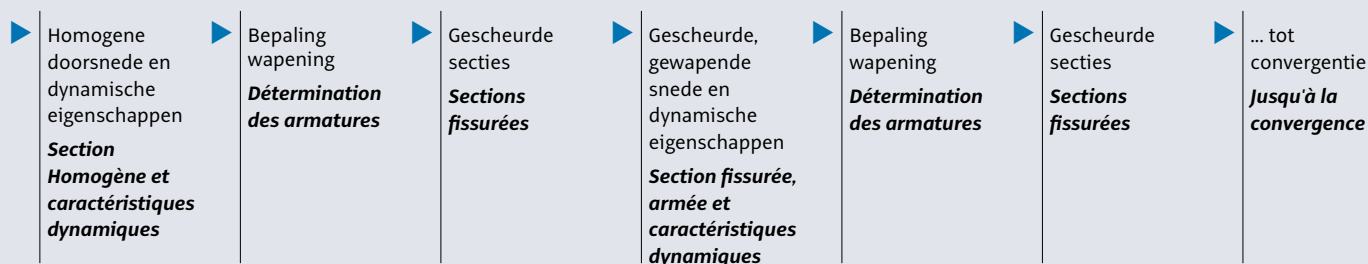
In het geval van een aardbeving hebben we te maken met een oscillerende belasting, wat maakt dat het beton op een aantal plaatsen quasi zeker

gescheurd zal zijn, mogelijk zelfs over de hele doorsnede. Op deze plaatsen treden er grotere verplaatsingen op. Dat zal op zijn beurt de krachtverdeling beïnvloeden. De voorheen geschetste berekening zal dan ook uitgebreid worden met een bepaling van de gescheurde zones, respectievelijke stijfheden (inclusief wapeningstaal) en terug moeten worden doorgerekend met aangepaste verplaatsingen en/of wapening tot gevolg. Doorgaans volstaat één extra routine.

De Eurocode laat toe om hier ogenblikkelijk van af te stappen door de homogene beginstijfheden te delen door een factor 2. Al kan dit leiden tot een

Illustratie van de algemene procedure

Illustration de la procédure générale



► Des solutions sont prévues ici aussi, via des éléments de plancher dotés d'un profil latéral sinusoïdal. Moyennant un bon dimensionnement des chaînages transversaux, ce joint dispose d'une capacité de résistance au cisaillement supérieure et de meilleures capacités de dissipation.

SCHÉMA DE CALCUL

Toute la conception parasismique est basée sur un certain nombre de principes: d'une part, des éléments horizontaux plus faibles, dans lesquels l'énergie doit se répartir, et d'autre part des assemblages et des composants verticaux (colonnes et voiles) robustes. D'où l'importance d'une approche théorique de l'assemblage la plus juste

possible. En le dimensionnant correctement, nous plaçons la résistance nécessaire au bon endroit.

En situation sismique, le travail de l'ingénieur se limite en pratique à inclure une analyse supplémentaire de cette même structure. Dans les applications classiques, une structure en béton est calculée de manière élastique avec les rigidités des sections en béton non fissurées et non armées. On en déduit les déplacements et les efforts, les zones soumises à traction sont alors dotées d'une armature de traction.

En ce qui concerne les séismes, la procédure générale consiste à calculer la déformation de la structure pour un

certain nombre de périodes propres, pour obtenir ensuite les forces correspondantes, compte tenu du facteur de comportement q évoqué ci-dessus.

Dans le cas d'un séisme, nous avons affaire à une charge dynamique et il est quasiment certain que le béton se fissurera à un certain nombre d'endroits, peut-être même à travers toute la section. Des déformations plus importantes se produisent dans ces zones. Par voie de conséquence, cela influencera la répartition des charges. Le calcul ébauché précédemment sera donc élargi à une analyse des zones fissurées, des rigidités respectives (y compris l'acier d'armature) et devra alors prendre en compte des déplacements adaptés

onnauwkeurigheid bij het bepalen van krachten en vervormingen, dit laatste is zeker van belang bij een aanbouw/uitbreiding.

De output van de meeste software programma's kan rechttoe rechtaan omgezet worden naar wapeningtekeningen toe. Alleen in de verbindingdetails moet er nog enig handmatig rekenwerk gebeuren. Quasi alle verbindingen kunnen trouwens gecontroleerd of ontworpen worden met behulp van hoofdstuk 6.2.5. uit de gewone EC2. Een aantal standaarden worden in de eurocode 8 dan weer opgegeven, maar extra rekenwerk wordt beloofd met een eenvoudige uitvoering.

Het is trouwens de moeite waard om te vermelden dat er de laatste tijd wel wat onderzoek wordt uitgevoerd naar verbindingmethoden die hogere q-waarden voor prefab constructie toelaten¹ en naar Self-centering concrete², enkele referenties zijn terug te vinden via de bijgaande linken. Door voorspanning op de juiste locatie en manier aan te brengen keert het beton naar zijn originele plaats terug na belangrijke verplaatsingen. Wie kent het drukpopje niet uit zijn kindertijd, opgebouwd uit een aantal (prefab) componenten die via het aanspannen van een eenvoudige elastiek terug in zijn beginvorm weerkeren. Een zeer eenvoudig principe, maar de

toepassing op constructies vraagt het betere rekenwerk.

VOORBEELDPROJECT

In België zijn de laatste jaren al een aantal projecten met prefab structuren ontworpen. Zie bijvoorbeeld het artikel p.29, waar AGC glass in Louvain-la-Neuve aan bod komt. De mooiste toepassing in het kader van dit thema-nummer rond bescherming ongetwijfeld te vinden in Ecuador. In 2015 werd StuBeCo gevraagd om mee te werken aan een project van de Ecuadoranse regering. Via een speciaal gebouwde fabriek te Riobamba wordt Ecuador voorzien van aardbevingsbestendige prefab (school)gebouwen. ▶



*Bouw Volvo
Rutten,
Hechtel-Eksel
Construction
Volvo Rutten,
Hechtel-Eksel*

et/ou une modification de l'armature. Une itération supplémentaire suffit généralement.

L'Eurocode permet cependant de se simplifier la vie en considérant des rigidités égales à la rigidité initiales divisées par 2. Bien que cela puisse entraîner une imprécision lors du calcul des forces et déformations, c'est certainement suffisant en première approche.

Dans la plupart des logiciels, les résultats de l'analyse peuvent être convertis directement en plans d'armature. Seuls les détails d'assemblage nécessitent un certain travail de calcul manuel. Quasiment tous les assemblages peuvent d'ailleurs être contrôlés ou

conçus à l'aide de la section 6.2.5. de l'EC2. Un certain nombre de solutions sont reprises dans l'Eurocode 8, mais un travail de conception additionnel permet généralement d'aboutir à une exécution plus simple.

Signalons que des recherches récentes ont étudiés des méthodes d'assemblage autorisant des valeurs q supérieures pour la construction préfabriquée¹ et des solutions structurelles avec capacité de recentrage². Plusieurs références peuvent être obtenues

via les liens suivants. En appliquant la précontrainte au bon endroit et de manière correcte, le béton revient à son emplacement d'origine même après des déplacements importants. Qui ne connaît pas le jouet articulé de son enfance, constitué d'un certain nombre de composants (préfabriqués) et qui reprend sa forme de départ lorsqu'un élastique est simplement tendu. Un principe très simple, mais son application aux constructions exige encore un travail de recherche et développement important. ▶

1 <http://elsa.jrc.ec.europa.eu/showproject.php?id=21>

2 <https://researchspace.auckland.ac.nz/handle/2292/6875>

De constructies moeten resistent zijn aan een referentie grondversnelling a_gR voor grondtype A tot 0,5-g (bv. Haïti 2010). Na de aardbeving van 16 april 2016 (nabij Muisne Magnitude 7.8) bleek een eerste parkinggebouw in Guayacuil (300 km van het epicentrum maar nog met schade en slachtoffers) de test glansrijk te hebben doorstaan.

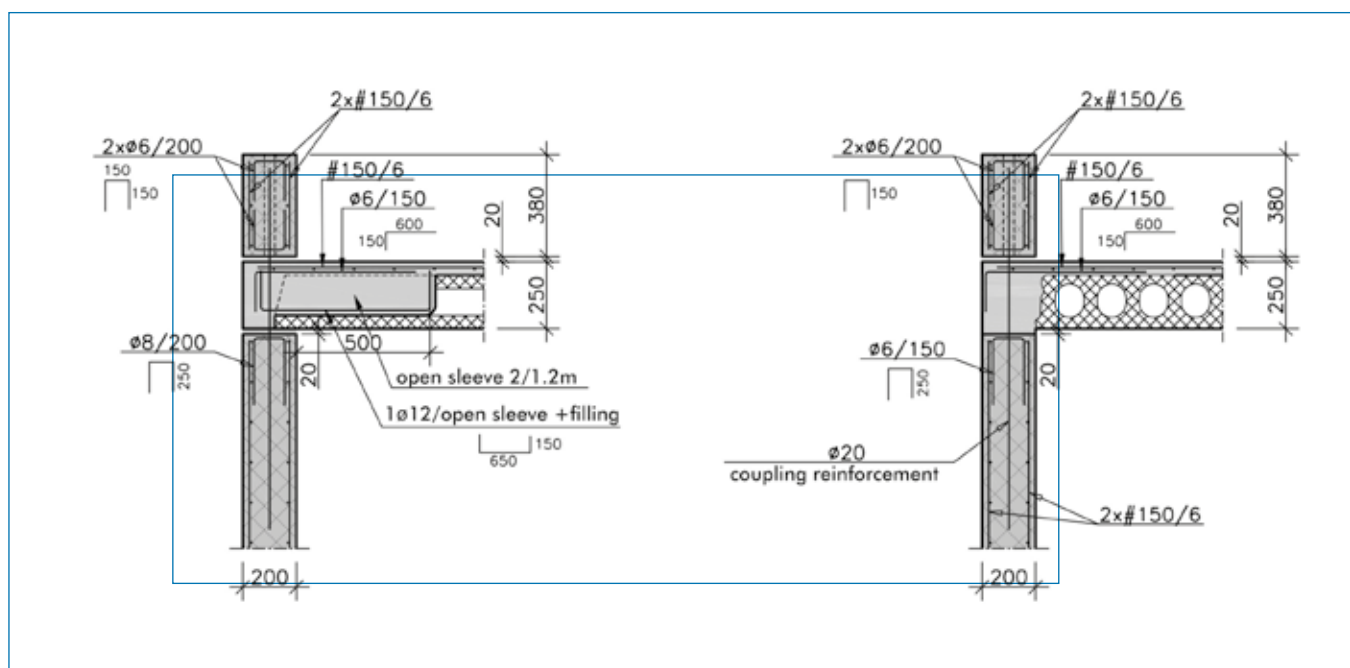
Door de realisatie van schoolgebouwen beschermt men de toekomst van het

land en realiseert men 'safehouse', zodat de bevolking in een post-aardbeving-scenario te kunnen overleven. Het ontbreken ervan heeft recent in Nepal nog aanleiding gegeven tot ontwrichting van volledige gemeenschappen. Een aantal voorheen gepresenteerde details zijn uit dit project geplukt (met consensus tussen NEC-11 en EC8). Hierbij dienden vooral de eenvoud van uitvoering en lage materiaalkost gerespecteerd te worden. ●

Recente voorbeelden van constructies die paraseismisch zijn gebouwd zijn: Volvo Rutten, Hechtel-Eksel – VISO, Hasselt – The Genesis voor AXA, Braine l'Alleud – Magazijn Lidl, Genk.

Detail van dakranden van geprefabriceerde gebouwen in Ecuador.

Détail des rives de bâtiments préfabriqués en Equateur.



EXEMPLE DE PROJET

En Belgique, un certain nombre de projets impliquant des structures préfabriquées ont déjà été conçus ces dernières années, compte tenu de l'action sismique. Voir par exemple l'article p.29 sur AGC glass à Louvain-la-Neuve. C'est sans aucun doute en Équateur que l'on trouve la plus belle application dans le cadre de cette thématique autour de la protection. En 2015, StuBeCo a été invitée à collaborer à un projet du gouvernement équatorien.

Grâce à une usine spécialement construite à Riobamba, l'Équateur se voit doter de bâtiments (scolaires)

préfabriqués parasismiques. Les constructions doivent résister à une accélération de référence du sol a_gR pour un type de sol A jusqu'à 0,5-g (p. ex. Haïti 2010). Après le séisme du 16 avril 2016 (près de Muisne, magnitude de 7,8), un premier immeuble de parking à Guayaquil (300 km de l'épicentre) semble avoir réussi brillamment le test (mais avec encore des dégâts et des victimes).

La réalisation de bâtiments scolaires permet de protéger l'avenir du pays et de réaliser des « safehouse », de sorte que la population puisse survivre dans un scénario d'après séisme. Leur absence a

récemment entraîné au Népal la désorganisation de communautés entières. Un certain nombre de détails présentés précédemment sont issus de ce projet (avec consensus entre NEC-11 et EC8). Il fallait ici garantir avant tout la facilité d'exécution et des frais de matériaux réduits. ●

De récents exemples de structures construites selon une conception parasismique: Volvo Rutten, Hechtel-Eksel – VISO, Hasselt – The Genesis pour AXA, Braine l'Alleud – Magasin Lidl, Genk.

Deze tekst is een samenwerking tussen Tom Molkens en Hervé Degée.

- Tom Molkens (StuBeCo bvba/Sweco Belgium nv) is zaakvoerder van StuBeCo, een ingenieursbureau dat gespecialiseerd is in engineering voor uitzonderlijke belastingen.
- Hervé Degée is vakgroepvoorzitter van de master industriële Wetenschappen Bouwkunde aan de UHasselt.

Met dank aan Echo Precast Engineering om de theorie in praktijk om te zetten in een niet-alledaagse omgeving en met 'nieuwe' randvoorwaarden.

Meer details over hoe men stijfheden van verbindingen kan berekenen en diverse voorbeeldprojecten zijn terug te vinden in een presentatie gegeven naar aanleiding van de 2de studiedag over aardbevingsweerstand van gebouwen – 14 december 2015 – UHasselt.

Er is behoorlijk wat informatie terug te vinden in de verschillende fib-bulletins, bijvoorbeeld nr. 27. Ook de gratis op het internet te downloaden publicatie "Guidelines for the use of Structural Precast Concrete in Buildings" van de New-Zealand concrete society kan een bron van informatie zijn voor extreme situaties (sommige afbeeldingen en oplossingen zijn wel gedateerd).

In de nabije toekomst ie-net een studiedag organiseren rond de gevolgen van het ANB op EN 1990 om de Belgische context beter te kunnen kaderen. Wilt u op de hoogte gehouden worden? Stuur een mailtje naar Yasmine Desenfants yasmine.desenfants@febe.be, met als subject 'seismisch bouwen'.



Bouw Volvo
Rutten,
Hechtel-Eksel
Construction
Volvo Rutten,
Hechtel-Eksel

Ce texte est le fruit de la collaboration menée entre Tom Molkens et Hervé Degée.

- Tom Molkens (StuBeCo bvba/Sweco Belgium nv) est l'administrateur de StuBeCo, un bureau d'études spécialisé en ingénierie pour des surcharges extrêmes.
- Hervé Degée est le président du Master en génie industriel « constructions » de l'UHasselt.

Avec l'aide d'Echo Precast Engineering pour la mise en pratique de la théorie dans un environnement hors du commun et avec de « nouvelles conditions-cadres. »

De plus amples détails sur la méthode de calcul des rigidités des assemblages et différents exemples de projets sont disponibles dans une présentation donnée à l'occasion de la 2ième journée d'étude - Résistance parasismique des bâtiments - 14 décembre 2015 - UHasselt.

Il est possible de trouver des informations plus détaillées dans les différents bulletins FIB, par exemple le n° 27. La publication « Guidelines for the use of Structural Precast Concrete in Buildings » de la New-Zealand Concrete Society, téléchargeable gratuitement sur Internet, peut aussi constituer une source d'informations en cas des conditions plus sévères (certaines illustrations et solutions datent néanmoins).

Prochamment, ie-net organisera une journée d'étude consacrée aux conséquences de l'ANB sur EN 1990 afin de pouvoir mieux cerner le contexte belge. Si vous désirez être tenu informé(e), veuillez envoyer un courriel à Yasmine Desenfants yasmine.desenfants@febe.be, avec en objet « construction parasismique ».