



Robuustheid

‘knap staaltje werk!’



Project	Afstudeeronderzoek
Periode	05-02-2018 / 29-05-2018
Afstudeerders	Rick Dielissen Suzan van den Winkel
Afstudeerbedrijf	Volantis B.V. Sint Jansweg 20c Venlo
Onderwijsinstelling	Hogeschool van Arnhem en Nijmegen (HAN) Ruitenberglaan 26 Arnhem

VOORWOORD

Voor u ligt de scriptie ‘Robuustheid: knap staaltje werk!’. Deze scriptie is geschreven in het kader van ons afstuderen aan de opleiding Bouwkunde aan de Hogeschool van Arnhem en Nijmegen (HAN) te Arnhem.

Na een afstudeerperiode van bijna vier maanden vormt dit rapport het eindresultaat van een onderzoek naar een onderwerp dat al jaren onder vuur ligt, namelijk: de robuustheid van constructies. Verschillende deskundigen die wij spraken waren blij verrast dat wij dit onderwerp aanpakten, anderen vonden het gedurfd.

Tijdens de uitvoering van het onderzoek hebben wij contact gehad met veel toonaangevende deskundigen op het gebied van robuustheid. Zo hebben we verschillende universiteiten bezocht en mochten we langskomen bij gemeentelijke instanties en grote ingenieurbureaus. Op deze manier hebben we het onderwerp van verschillende kanten kunnen bekijken. De kennis die we afgelopen semester vanuit de minor *Creatief Construeren* hebben vergaard heeft ook zeker een grote bijdrage geleverd aan de invulling van dit rapport. Tevens heeft de praktijkervaring die we afgelopen jaren hebben opgedaan tijdens de verschillende stages ons inzicht in de werking van constructies aanzienlijk vergroot.

Vier maanden lang heeft ingenieurbureau Volantis ons gefaciliteerd in een fulltime werkplek en wettelijke begeleiding. Mede door onze afstudeerbegeleider Thore Carsten en de begeleiders vanuit school, Kees van der Zijden en Gijs Pelgrom, heeft dit rapport invulling gekregen en is het onderzoek naar een hoger niveau getild.

Bij dezen willen wij graag onze begeleiders bedanken voor de raad en fijne ondersteuning tijdens dit traject. Ook willen we alle deskundigen bedanken die ons persoonlijk ofwel via de mail of telefonisch te woord hebben gestaan. Zonder hun bijdrage had dit rapport niet tot stand kunnen komen. Als laatste willen we onze vrienden en familie bedanken voor de wijze raad die we van hen hebben mogen ontvangen.

Wij wensen jullie veel leesplezier toe.

Rick Dielissen
Suzan van den Winkel

Arnhem, 28 mei 2018

SAMENVATTING

Elk bouwwerk in Nederland moet voldoen aan de geldende bouwvoorschriften, die op dit moment staan beschreven in het Bouwbesluit 2012. Sinds 1 april 2012 verwijst het Bouwbesluit in de tekst naar andere normen, namelijk naar de Eurocodes. Eurocodes zijn Europese normen voor het toetsen en beoordelen van de constructieve veiligheid van diverse nieuwbouwconstructies. Niet alle normdelen van de Eurocode worden door het Bouwbesluit aangewezen; niet aangewezen delen zijn niet geldend in Nederland. In sommige gevallen bevat de Eurocode bruikbare voorschriften die in Nederland wel gehanteerd worden terwijl deze niet wettelijk verplicht zijn. Een voorbeeld hiervan is het artikel uit de Eurocode over de beschouwing van een buitengewone belasting met een onbekende oorzaak.

Verwarrende regelgeving buitengewone belastingen

Buitengewone belastingen, ook wel bijzondere belastingen, zijn belastingen die normaal gesproken tijdens de levensduur niet aanwezig zijn. Er wordt onderscheid gemaakt tussen:

- belastingen met een bekende oorzaak (botsingen en ontploffingen) en
- belastingen met een onbekende oorzaak (menselijke fout).

Het Bouwbesluit verwijst alleen naar de regels van de Eurocode om een constructie te beschermen tegen bekende belastingen. Terwijl 80 tot 90 procent van de schadegevallen aan bouwwerken wordt veroorzaakt door gevolgen van een menselijke fout, wordt de beschouwing van onbekende buitengewone belasting door het Bouwbesluit niet verplicht gesteld. De Eurocode schrijft wel methoden voor om de constructie hiertegen te beschermen: Een constructie moet zodanig ontworpen en uitgevoerd zijn, dat zij in dergelijke situatie niet disproportioneel beschadigt (voldoende robuust maken).

Bouwvoorschriften schieten te kort

Analyse van de visie en aanpak van verschillende vak-experts, zoals: Dhr. Vrouwenfelder en Dhr. Walraven van de Technische Universiteit van Delft en Dhr. Bezemer en Dhr. Willems van gemeente Rotterdam (*H4 Praktijkonderzoek*) toont aan dat de bouwvoorschriften betreft robuustheid op dit moment behoorlijk te kort schieten. Naast het grote gemis van het niet beschouwen buitengewone belastingen met onbekende oorzaak, wordt de effectiviteit van de door de Eurocode aangedragen maatregelen ter voorkoming van onbekende oorzaken behoorlijk in twijfel getrokken (wanneer is een constructie voldoende robuust?).

Door de tekortkoming in de bouwvoorschriften, is het juist omgaan met het begrip robuustheid voor constructeurs niet eenvoudig. Vaak wordt er slechts uitgegaan van de minimumeisen van het Bouwbesluit en worden elementen afzonderlijk getoetst. En dat terwijl robuustheid in een constructie juist draait om reservecapaciteit én de samenhang van een constructie.

Onderzoek naar impact

Om het gewenste constructieve veiligheidsniveau (zoals vastgelegd in het Bouwbesluit) voor elk bouwwerk in Nederland nagenoeg gelijk te houden, is opheldering van essentieel belang! In dit afstudeeronderzoek wordt onderzocht: **Welke impact de gevolgen van onbekende buitengewone belastingen hebben op de constructie van bouwwerken volgens gevolgklasse CC2 en CC3¹**. En wordt geadviseerd op welke manier het Bouwbesluit aangevuld zou moeten worden met normen uit de Eurocode om de impact van onbekende buitengewone belastingen te reduceren.

¹ Gevolgklassen (CC1, CC2 en CC3) zijn ingevoerd om het verschil in grootte tussen diverse bouwwerken in de constructieve berekening mee te nemen. Deze gevolgklassen zijn gebaseerd op de impact van de gevolgen van het bezwijken van de constructie.

Risicoanalyse

Een risicoanalyse helpt bij het toetsen van een constructie op robuustheid. Nagenoeg alle onder-vraagde experts zien een dergelijke analyse graag in de basis van een robuustheidsbeoordeling staan. Hoewel bronnen niet eensgezind zijn over de invulling (enerzijds schatting van kansen en gevolgen, anderzijds beoordeling van afzonderlijke constructie-elementen), zijn ze het er wel over eens dat maatregelen per gevolgklasse getroffen moeten worden.

Tweede draagweg

De te treffen maatregelen komen voort uit verschillende door de Eurocode voorgeschreven metho-den. De tweede draagweg methode blijkt de beste oplossing. Het fictief verwijderen van kolommen komt het best overeen met de werkelijke situatie bij onvoorziene omstandigheden. Bovendien is de toepassing controleerbaar en objectief. Toch plaatsen veel ontwerpende constructeurs een kanteke-nig bij deze methode. Zij veronderstellen dat de tweede draagweg aanpassingen tot gevolg hebben, die niet in verhouding staan met de kans dat een risico daadwerkelijk voorkomt. Gemeente Rotter-dam, berucht vanwege het eisen van de tweede draagweg, vermeldt daarentegen dat deze methode helemaal niet zo'n zware constructie ingrepen veroorzaakt.

Conclusie: de impact

In de kwantitatieve beschouwing van het rapport is de uitspraak van gemeente Rotterdam bestu-deerd, waarbij zowel de impact voor gevolgklasse CC2 als CC3 is onderzocht. De impact is vertaald naar het percentage extra benodigd staal ten opzichte van de basisconstructie. De resultaten² uit de berekening zijn als volgt:

- Raamwerk volgens CC2: 17,5% extra benodigd staal
- Raamwerk volgens CC3: 16,4% extra benodigd staal

Een berekening voor een betonnen raamwerk zal ongeveer een gelijk resultaat tonen qua percentage extra materiaal, omdat het vooral gaat om de verhouding van de momenten.

De impact ten gevolge van een onbekende buitengewone belasting is op een CC3-bouwwerk kleiner, dan op een CC2-bouwwerk, omdat een CC3 constructie vanwege haar grotere belastingfactoren al meer robuustheid bezit dan een CC2-constructie.

Advies: reduceren impact

Het reduceren van de impact start altijd met een risicoanalyse, dat de aanwezige belastingrisico's be-oordeelt. De meest betrouwbare methode om een constructie robuust te maken, is de tweede draagweg toepassing. Bij deze methode wordt naar de samenhang van de constructie gekeken en is via berekeningen controleerbaar en objectief. Echter is een tweede draagweg toepassing niet altijd mogelijk. Hoewel het niet de voorkeur heeft, is het in sommige situaties niet te voorkomen een ele-ment individueel te beschouwen (key-element). Deze werkwijze om de impact te reduceren, kan als input dienen voor een eenduidige regelgeving.

Advies: eenduidige regelgeving

Om onduidelijkheid weg te nemen én toekomstige bouwfouten en instortingen te voorkomen moet het Bouwbesluit aangevuld worden met een nieuwe norm betreffende de omgang met disproportio-nele instorting bij een onbekende oorzaak. Een commissie van vakexperts kan zich buigen over een eenduidige omschrijving, die als nationaal geldende norm, geen ruimte overlaat voor eigen interpre-taties en discussies over constructieve keuzes voorkomt. Deze preventieve norm zal ontwerpteams dwingen tot het veiliger maken van alle nieuwe bouwwerken in Nederland, een knap staaltje werk!

² In werkelijkheid zal het percentage lager uitvallen, omdat er slechts uitgegaan is van de reservecapaciteit bin-nen één stramien (de rest van de constructie zal ook extra krachten opvangen).

SUMMARY

In the Netherlands, every building must comply with the applicable building regulations, which are currently described in Bouwbesluit 2012. Since the 1st of April 2012, the Bouwbesluit 2012 refers in the text to other standards, namely the Eurocodes. Eurocodes are European standards for testing and assessing the structural safety of various new construction constructions. Not all parts of the Eurocode are designated by the Bouwbesluit; not designated parts are not valid in the Netherlands. In some cases, the Eurocode contains useful regulations that are applied in the Netherlands while they are not legally required. An example of this is the article from the Eurocode on the consideration of an accidental action with an unknown cause.

Accidental loads are loads which are unlikely to occur on a structure during the design working life. Usually the duration is short but the magnitude is significant. Examples of loads with known causes are collisions and explosions. To protect a construction against these loads, the Eurocode has prescribed rules. The Bouwbesluit refers in the text to the relevant part of the Eurocode.

An example of a load with an unknown cause is the human error. While 80 to 90% of the damages of buildings is caused by the consequences of a human error, the assessment of this accidental load is *not* made obligatory by the Bouwbesluit. However, the Eurocode *does* propose methods to protect the construction against these unknown accidental loads. This discrepancy leads to confusion.

According to the Eurocode, a structure must be designed and constructed in such a way that it will not be disproportionately damaged in events such as explosions, shock loads and the consequences of human error. When a construction can withstand these extraordinary loads, it has sufficient robustness according to the standard. The formulation *sufficient robustness* raises a number of questions such as: What is sufficient? And when is a construction robust?

Despite the fact that the Eurocodes have been in force for six years, the necessary clarity is still lacking.

In order to keep the desired structural safety level – as recorded by the Bouwbesluit – virtually the same for every building in the Netherlands, it is essential to elucidate it. In this research this is attempted by analysing and summarizing the vision and approach of various experts, which are described in *H4 Praktijkonderzoek*. There have been several interviews with both designing and assessing constructors, think of Mr. Vrouwenvelder and Mr. Walraven from the Technical University of Delft, and to Mr. Bezemer and Mr. Willemen of the municipality of Rotterdam.

In the interviews, it was clear that the building regulations are currently inadequate in terms of robustness. On the one hand, the absence in the Bouwbesluit of the assessment of accidental load with unknown cause and on the other hand the effectiveness of the methods as suggested by the Eurocode with regard to this unknown cause is seriously questioned.

Not only the building regulations fall short, even the constructors themselves do not always deal with the concept of robustness. For example, they often only start from the minimum requirements of the Bouwbesluit, while robustness in a construction revolves around reserve capacity. Also, not every constructor sees that robustness mainly concerns the cohesion of a structure. The separate testing of elements, such as the method of key elements, adds little to this.

Solutions for the above problems are mainly resolved by making a risk analysis. The content of this analysis is currently being discussed, but virtually every surveyed expert would like to see such an analysis as the basis for a robustness assessment. Some experts prefer the risk analysis in the form of an estimation of the probability and the effect on certain risk scenarios. Others have a preference for the separate assessment of construction elements. What most experts agree on is that the measures that emerge from this risk analysis are based on the consequence classes.

The measures – as described above – result from different methods prescribed by the Eurocode. The method of application the alternative load paths appears to be the best solution according to various experts. It seems to be the most reliable method to provide a structure with sufficient capacity for rescinding in the event of unknown accidental loads. The fictitious removal of the columns corresponds best to the actual situation in unknown circumstances. The application is also controllable and almost entirely objective.

Nevertheless, the method of the alternative load paths is resisted by many designing constructors. They assume that this requirement may involve adjustments that are not in proportion to the probability that it occurs. The municipality of Rotterdam, notorious for demanding the alternative load path, states that this method does not have to involve such severe interventions on the construction at all.

In the quantitative consideration of this report, the above statement of the municipality of Rotterdam was scrutinized. With a fairly basic calculation, we investigated the extent of the impact of the application of an alternative load path. The approach has been kept basic and a representative framework has been used. The impact for both consequence classes CC2 and CC3 has been investigated. This impact has been translated into the percentage of extra required steel in relation to the basic construction. The results from the calculations are:

- extra framework according to CC2: 17,5%
- extra framework according to CC3: 16.4%

The calculated percentage will actually be lower. The simplistic calculation is based only on the spare capacity within one grid. In reality, the rest of the structure will also cooperate with absorbing the extra forces. The results of a concrete framework will be approximately in the same order of magnitude in terms of extra material since the calculation mainly involves the proportions of the moments.

The relatively low percentages indicate that applying an alternative load path can be cost-effective. Nevertheless, there is still a long way to go in terms of robustness in the Netherlands. The building regulations must be clearer and the grey areas must be clarified. If it comes to that, it will yield a lot: major building damages are prevented and collapses are limited. This solution is going to save lives. That is why supplementing the Bouwbesluit with a standard on prevention of disproportionate collapse in an unknown cause, a great piece of work!

INHOUDSOPGAVE

Voorwoord	I
Samenvatting	II
Summary	IV
Inhoudsopgave	VI
Bijlagen	VIII
Figuren	IX
Tabellen	X
Symbolen	X
1 Inleiding	1
1.1 Aanleiding	1
1.2 Leeswijzer	2
2 Afstudeeronderzoek	3
2.1 Doelstelling	3
2.2 Onderzoeksvraag	3
2.3 Deelvragen	3
2.4 Afbakening	4
2.5 Methodiek	4
3 Literatuuronderzoek	5
3.1 Nederlandse regelgeving over robuustheid	6
3.2 Disproportionele schade	7
3.3 Belastingcombinaties	8
3.3.1 Ontwerpsituatie	8
3.3.2 Grenstoestand	8
3.3.3 Gevolgklassen	9
3.3.4 Conclusie	9
3.4 Instortingen	10
3.5 Ontwerpstrategieën	11
3.6 Gebruik van gevolgklassen	12
3.6.1 Gevolgklasse CC3	12
3.6.2 Gevolgklasse CC2	12
3.6.3 Conclusie	13
3.7 Tweede draagweg	14
3.7.1 Trekbanden	14
3.7.2 Rekenmethodiek	15
3.8 Beantwoording deelvragen	17

4 Praktijkonderzoek	18
4.1 Ondervraagde experts	18
4.2 Bouwvoorschriften	19
4.2.1 Tekortkoming Bouwbesluit 2012	19
4.2.2 Effectiviteit regels Eurocode	19
4.2.3 Oplossing eenduidigheid	20
4.2.4 Gevolgklassen	21
4.3 Robuustheid in de praktijk	22
4.3.1 Menselijke fout als onbekende oorzaak	22
4.3.2 Beoordeling robuustheid	22
4.3.3 Eisen praktische toepassing robuustheid	24
4.4 Verplichtstellen beschouwing onbekende oorzaak	26
4.4.1 Verplichtstellen tweede draagweg	27
4.4.2 Gemeente Rotterdam	27
4.5 Beantwoording deelvragen	29
5 Kwalitatieve beschouwing	30
5.1 Eenduidige regelgeving	31
5.1.1 Oplossing	31
5.2 Toetsen van robuustheid	32
5.2.1 Beoordelen constructie-elementen	32
5.3 Toepassing robuustheid	35
5.3.1 Disproportioneel	35
5.3.2 Methoden	35
5.4 Beantwoording deelvragen	36
6 Kwantitatieve beschouwing	37
6.1 Uitgangspunten en aannames	38
6.1.1 Het basismodel	38
6.1.2 Aanpak berekening	39
6.1.3 Hypothesen	39
6.2 Basismodel	40
6.3 Calamiteitenmodel	41
6.3.1 Beschouwing buitengewone ontwerpsituatie 1	42
6.3.2 Beschouwing buitengewone ontwerpsituatie 2	43
6.3.3 Beschouwing buitengewone ontwerpsituatie 3	43
6.3.4 Beschouwing buitengewone ontwerpsituatie 4	44
6.3.5 Beschouwing buitengewone ontwerpsituatie 5	44
6.3.6 Beschouwing buitengewone ontwerpsituatie 6	45
6.3.7 Combinatiemodel 1 (CC2)	45
6.4 Resultaat	45
6.5 Beantwoording deelvraag	46
7 Conclusie en aanbevelingen	47
7.1 Voorstel eenduidige regelgeving	48
7.2 Beantwoording hoofdvraag	48
7.2.1 Impact reduceren	49
8 Nawoord	51
9 Bronnenlijst	52

BIJLAGEN

Onderstaande bijlagen dienen ter versterking van dit onderzoek en zijn apart aangeleverd.

Hoofdmap: Bijlagen

↳ Map A: Literatuuronderzoek

- ↳ A1.1 Regelgeving: In Nederland
- ↳ A1.2 Regelgeving: Gevolgklassen
- ↳ A2.1 Referentierapport 1: Spelen met vuur
- ↳ A2.2 Referentierapport 2: Voorkomen is beter dan genezen
- ↳ A2.3 Referentierapport 3: Tweede draagweg van een hoekveld in prefab beton
- ↳ A2.4 Referentierapport 4: Voortschrijdende instorting bij prefab betonconstructies
- ↳ A3.1 Begrip: MN-Kappa
- ↳ A3.2 Begrip: Key-elements
- ↳ A3.3 Begrip: Probabilistisch rekenen
- ↳ A3.4 Begrip: Plastisch rekenen
- ↳ A3.5 Begrip: BLEVE
- ↳ A3.6 Begrip: Redundantie
- ↳ A3.7 Begrip: Ductiliteit
- ↳ A3.8 Begrip: Robuustheid
- ↳ A4 Praktijkvoorbeelden

↳ Map B: Praktijkonderzoek

- ↳ B1 Interviews

↳ Map C: Kwantitatieve beschouwing

- ↳ C1 Toetsing tweede draagweg

↳ Map D: Plan van aanpak

- ↳ D1 Plan van aanpak
- ↳ D2 Overall planning

↳ Map E: Procesmap

- ↳ E1.1 Individuele reflectie 1
- ↳ E1.2 Individuele reflectie 2
- ↳ E2 Groepsreflectie
- ↳ E3 Urenverantwoording
- ↳ E4 Projectsamenvatting
- ↳ E5 Notulen

↳ Map F: Rekenmodellen

- ↳ F1.1 RFEM modellen CC2
- ↳ F1.2 RFEM modellen CC3
- ↳ F2.1 Excel berekening modellen CC2
- ↳ F2.2 Excel berekening modellen CC3

FIGUREN

Figuur 1: Methodiek alternatieve krachtsafdracht	2
Figuur 2: Belastingcombinatie, blijvend, UGT (vergelijking 6.10a)	8
Figuur 3: Belastingfactoren, ingevuld voor woonruimte	9
Figuur 4: Instabiliteitsinstorting (De Boer, 2012)	10
Figuur 5: Strategieën voor buitengewone ontwerpsituaties	11
Figuur 6: Cantileverwerking	14
Figuur 7: Wand-ligger mechanisme	14
Figuur 8: Principe trekbanden tussenkolom (a) eindkolom (b).....	14
Figuur 9: Basismodel in RFEM, blijvende ontwerpsituatie.....	15
Figuur 10: Dakvloer blijvende ontwerpsituatie	15
Figuur 11: Buitengewone ontwerpsituatie I & II	15
Figuur 12: Dakvloer buitengewone ontwerpsituatie I	16
Figuur 13: Dakvloer buitengewone ontwerpsituatie II	16
Figuur 14: Constructie met wandenstructuur,	19
Figuur 15: Constructie met wandenstructuur,	19
Figuur 16: Schematische weergrave instorting Ronan Point (Dijk, 2011)	20
Figuur 17: Principe stempels bouwput.....	28
Figuur 18: Constructie in normale toestand	33
Figuur 19: Constructie na het bezwijken van een kolom	33
Figuur 20: Basismodel in Revit	37
Figuur 21: Plattegrond en doorsnede stramien 4 van het basismodel in Revit	38
Figuur 22: Verklaring raamwerkprofielen	39
Figuur 23: Mechanicaschema raamwerk in de UGT.....	40
Figuur 24: Mechanicaschema raamwerk in de BGT	40
Figuur 25: Overzicht staalprofielen raamwerk.....	40
Figuur 26: Buitengewone ontwerpsituaties met globale vervormingen	41
Figuur 27: Vervormingslijn raamwerk optie A	42
Figuur 28: Vervormingslijn raamwerk optie B.....	42
Figuur 29: Vervormingslijn dakligger in buit. ontwerpsit. 2	43
Figuur 30: Toetsing key-element.....	43
Figuur 31: Vervormingslijn raamwerk in buit. ontwerpsit. 5	44
Figuur 32: Vervormingslijn raamwerk in buit. ontwerpsit. 6	44
Figuur 33: Raamwerk combinatiemodel 1	45
Figuur 34: Principe trekbanden	49

TABELLEN

Tabel 1: Definitie van gevolgklassen	9
Tabel 2: Overzicht staalprofielen.....	16
Tabel 3: Risicomatrix gebaseerd op risicoscenario's.....	23
Tabel 4: Voor- en nadelen risicoanalyse en tweede draagweg (Wijte, et al., 2006).....	25
Tabel 5: Lijst van voorgestelde updates en uitbreidingen voor MC2020 betreft robuustheid (inclusief Nederlandse vertaling)	26
Tabel 6: Risicomatrix (ingevuld voorbeeld).....	32
Tabel 7: Voorbeelden incasseringsvermogen van bouwmethoden.....	33
Tabel 8: Maatregelen behorend bij risicomatrix.....	34
Tabel 9: Overzicht impact.....	46

SYMBOLEN

A_d	= buitengewone belasting
F_w	= windbelasting
q_d	= rekenwaarde verdeelde belasting
$G_{k,j}$	= karakteristieke waarde van blijvende belasting j
$Q_{k,j}$	= karakteristieke waarde van veranderlijke belasting j
$Q_{k,1}$	= karakteristieke waarde van overheersende veranderlijke belasting
b	= breedte
l	= lengte

1 INLEIDING

In de afgelopen jaren is er meer aandacht gekomen voor het voorkomen van zowel gedeeltelijke als algehele instortingen van bouwwerken. De instorting van de parkeergarage bij Eindhoven Airport, die plaatsvond op 27 mei 2017 (Eindhovens Dagblad, 2017), is een voorbeeld van een gedeeltelijke instorting. Dit voorval heeft internationale aandacht getrokken en tot op heden wordt er over het voorkomen van dergelijke instortingen veel geschreven en gediscussieerd.

Waar diverse nieuwsbronnen het instorten van de parkeergarage voornamelijk wijten aan de slechte schuifverbinding tussen de prefabschil van de bollenplaatvloer en de opstorting, haalt Ir. Thijs Pierik in zijn artikel *Instorting parkeergarage Eindhoven Airport; incident of trend?* (Pierik, 2017) de begrippen *robuustheid* en *ductiliteit* aan.

Pierik stelt dat wanneer de verbinding tussen de prefabschil van de bollenplaatvloer en de opstorting voorzien was van zowel voldoende *robuustheid* als *ductiliteit*, er geen sprake was van bros breken, maar van langzaam bezwijken. De grote vervormingen die met dit laatste tot stand komen, geven voldoende waarschuwing waarna gehandeld kan worden.

1.1 Aanleiding

Robuustheid staat voor voldoende sterkte bij buitengewone omstandigheden en voorkomt disproportionele schade aan constructies, zoals de gedeeltelijke instorting van de parkeergarage bij Eindhoven Airport.

Sinds de aanwijzing van NEN-EN 1990 in Bouwbesluit 2012 is het voldoen aan de eis van robuustheid verplicht. In deze normtekst staat wel vermeld dat een constructie over voldoende robuustheid moet bezitten, maar niet hoe aan deze eis kan worden voldaan. Om deze reden zorgt het begrip *voldoende robuustheid* voor veel discussie in de constructiebranche.

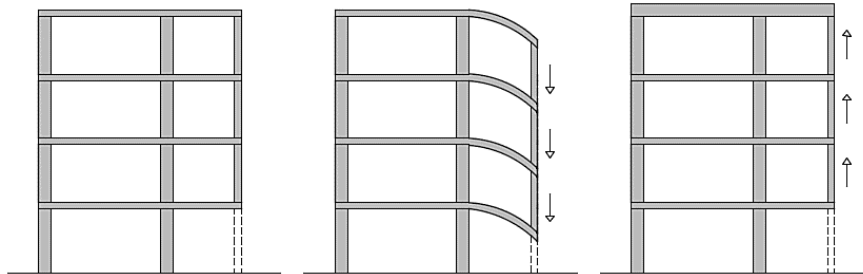
Volgens diverse artikelen is de regelgeving betreft het robuust bouwen niet eenduidig genoeg. Met name de strategie om een constructie te beschermen tegen onvoorziene omstandigheden die ontstaan door een *onbekende oorzaak* behoeft opheldering.

De menselijke fout, één van de oorzaken van de instorting van de parkeergarage, wordt volgens de Eurocode beschouwd als een onbekende buitengewone belasting. Uit onderzoek is gebleken dat 80 tot 90% van de schadegevallen aan bouwwerken in Nederland veroorzaakt wordt als gevolg van een menselijke fout (Terwel, 2015). Dit aanzienlijke percentage maakt het opmerkelijk dat de beschouwing van deze fouten niet wettelijk verplicht is.

Een ander bekend voorbeeld is de instorting van de balkons van Patio Sevilla in Maastricht op 24 april 2003 (NRC, 2003). In zowel de ontwerpfase als in de uitvoeringsfase zijn er fouten gemaakt, waardoor het laagstgelegen balkon en vervolgens de bovenliggende balkons, tijdens de ingebruikname naar beneden zijn gekomen.

Hoewel het Bouwbesluit de beschouwing van menselijke fouten niet verplicht stelt, geeft de informatieve bijlage A van NEN-EN 1991-1-7 toch bruikbare methodes om een constructie bij onbekende oorzaken van voldoende robuustheid te voorzien. Een veelbesproken methode is de toepassing van een tweede draagweg. Een tweede draagweg geeft een constructie de mogelijkheid om bij het bezwijken van een dragend element, zoals een kolom, de krachten af te dragen naar elders in de constructie.

In *Figuur 1: Methodiek alternatieve krachtsafdracht* is de methodiek van een tweede draagweg weer-gegeven. Te zien is dat het rechterdeel van de constructie instort wanneer de onderliggende kolom bezwijkt. In plaats van een directe verticale krachtsafdracht naar beneden, wordt een principe toegepast waarbij de constructie als het ware wordt ‘opgehangen’ aan de dakconstructie. Deze methode had bij de balkons van Patio Sevilla disproportionele instorting mogelijk kunnen voorkomen.



Figuur 1: Methodiek alternatieve krachtsafdracht

De voorbeelden van de parkeergarage van Eindhoven Airport en van de balkons van Patio Sevilla benadrukken zowel de behoefte aan een duidelijke norm voor het beschouwen van menselijke fouten, als de behoefte aan een duidelijke norm voor het toepassen van een tweede draagweg.

Door het ontbreken van duidelijke prestatie-eisen kent het voorzien van voldoende robuustheid zijn moeilijkheden. Daarbij komt het feit dat de onbekende oorzaken bij bouwwerken in Nederland nauwelijks beschouwd worden. Hierdoor heeft de gemiddelde constructeur onvoldoende kennis over het gedrag van de constructie bij buitengewone belastingsituaties. Men dient bij het toetsen op robuustheid voldoende inzicht in de materie te hebben om zeker te weten dat een bepaalde belasting-situatie bereikt wordt.

Ondanks het gebrek aan duidelijke prestatie-eisen, worden er op dit gebied toch al enkele jaren keuzes gemaakt door zowel ontwerpende als toetsende constructeurs. In dit onderzoek worden de visies van die experts, wat betreft beoordeling van robuustheid onder de loep genomen. Tijd voor opheldering!

1.2 Leeswijzer

Het onderzoeksrapport start met een beknopte omschrijving van de opzet en afbakening van het onderzoek, dat terug te vinden is in hoofdstuk 2.

In hoofdstuk 3 wordt ingegaan op de theoretische achtergronden van robuustheid aan de hand van een literatuurstudie. De discussiepunten achter de theorie worden met behulp van interviews in hoofdstuk 4 in kaart gebracht. In hoofdstuk 5 wordt een eigen opvatting over robuustheid gegeven. Hoofdstuk 6, de kwantitatieve beschouwing, dient als concreet rekenvoorbeeld en ter onderbouwing van hoofdstuk 5.

Elke hoofdstuk (met uitzondering van hoofdstuk 2) begint met een beknopte omschrijving van de inhoud en wordt afgesloten met de beantwoording van een aantal deelvragen. De antwoorden worden gevormd aan de hand van de verkregen informatie uit het desbetreffende hoofdstuk.

2 AFSTUDEERONDERZOEK

2.1 Doelstelling

Het doel van dit onderzoek is enerzijds het scheppen van eenduidigheid betreft de regelgeving rondom het robuust ontwerpen. Anderzijds moet uit dit onderzoek blijken hoeveel impact robuustheid op een constructief ontwerp heeft. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen CC2 en CC3.

2.2 Onderzoeksvraag

Welke impact hebben de gevolgen van onbekende buitengewone belastingen op de constructie van bouwwerken volgens gevolgklasse CC2 en CC3?

2.3 Deelvragen

Literatuuronderzoek:

1. Wat zegt de Nederlandse regelgeving over robuustheid?
2. Wanneer is een instorting disproportioneel?
3. Wat is er bekend over de oorzaak van disproportionele instortingen van constructies?
4. Welke oplossingen reikt de Eurocode aan om disproportionele instortingen te voorkomen?
5. Hoe werkt een tweede draagweg?

Praktijkonderzoek:

1. Waar schieten de bouwvoorschriften tekort met betrekking tot robuustheid?
2. Waar schieten constructeurs tekort met betrekking tot robuustheid?
3. Hoe kan een gebouw op robuustheid beoordeeld worden?
4. Wat zijn de moeilijkheden van gevolgsclassificatie?

Kwalitatieve beschouwing:

1. Hoe kan de discrepantie tussen het Bouwbesluit en de Eurocode, betreffende de beschouwing van de onbekende buitengewone belasting, geëlimineerd worden?
2. Wanneer is een instorting disproportioneel?
3. Wat is de beste methode om een gebouw voldoende incasseringsvermogen mee te geven, om het te kunnen beschermen tegen onbekende buitengewone belastingen?

Kwantitatieve beschouwing:

1. Welke invloed heeft het wegvallen van een dragend element op het gedrag van een (staal)constructie?

2.4 Afbakening

Het onderwerp van dit onderzoek is *robuustheid*, een heel erg ruim begrip. Om het onderzoek af te bakenen zijn er projectgrenzen gesteld:

- Het onderzoek richt zich alleen op de moeilijkheden betreffende buitengewone belastingen met een onbekende oorzaak. De Eurocode en het Bouwbesluit zijn helder wat betreft bekende oorzaken, maar schieten tekort in oplossingen voor de onbekende belastingen.
- Het onderzoek beschouwt alleen de robuustheid van gebouwen en niet van bruggen.
- De robuustheid is bekeken op systeemniveau (niet op elementenniveau).
- De casestudie in de kwantitatieve beschouwing is gericht op staalconstructies.
- De impact van de tweede draagweg is slechts op één stramien onderzocht.

2.5 Methodiek

In dit afstudeeronderzoek zullen de moeilijkheden van het robuust ontwerpen in kaart worden gebracht. Het afstudeeronderzoek is hiervoor opgedeeld in vijf fases.

Fase 1 : Literatuuronderzoek

Allereerst wordt bestaande kennis over de regelgeving van gevolgklassen en robuust bouwen geraadpleegd. De informatie uit de literatuur helpt met de beantwoording van de hoofd- en deelvragen in het afstudeeronderzoek. De relevante informatie is onder andere gevonden in artikelen uit vakbladen, wetboeken en afstudeeronderzoeken.

Fase 2: Praktijkonderzoek

In het praktijkonderzoek worden de ‘grijze gebieden’ die affiniteit hebben met *robustheid* uit zowel de Eurocode als het Bouwbesluit belicht. Deze worden vastgesteld aan de hand van wetenschappelijke artikelen uit vakbladen en middels afgenomen interviews met experts.

Fase 3: Kwalitatieve beschouwing

Deze beschouwing beschrijft hoe de robuustheid te beoordelen en te waarborgen is, zodat er bij onbekende buitengewone belastingen geen sprake is van disproportionele instorting. Dit gebeurt aan de hand van eigen interpretaties die gevormd worden door het praktijkonderzoek.

Fase 4: Kwantitatieve beschouwing

Deze beschouwing dient als rekenkundige onderbouwing voor de kwalitatieve beschouwing. Middels een rekenvoorbeeld wordt, per gevolgklasse, de impact van de tweede draagweg op een staalconstructie getoetst.

Fase 5: Conclusies en aanbevelingen

De resultaten uit de kwalitatieve en kwantitatieve beschouwing worden met elkaar vergeleken. Uit de resultaten volgt een conclusie en aanbeveling over hoe om te gaan met de robuustheid van bouwconstructies. De eindconclusie geeft antwoord op de hoofdvraag van het afstudeeronderzoek.

3 LITERATUURONDERZOEK

Met dit literatuuronderzoek wordt getracht een betrouwbaar overzicht te verkrijgen van de literatuur die over het begrip *robuustheid* is gepubliceerd. Op deze manier wordt een wetenschappelijke basis gegeven aan het afstudeeronderzoek. Om de literatuur rondom het begrip *robuustheid* nader te onderzoeken, zijn de volgende taken uitgevoerd:

- er is een studie gedaan naar de Nederlandse regelgeving met betrekking tot robuustheid,
- de reeds aangedragen oorzaken van instortingen zijn onderzocht en
- de mogelijke oplossingen voor deze instortingen zijn onder de loep genomen.

In de literatuur-/voorstudie wordt gezocht naar antwoord op de volgende deelvragen:

1. Wat zegt de Nederlandse regelgeving over robuustheid?
2. Wanneer is een instorting disproportioneel?
3. Wat is er bekend over de oorzaak van disproportionele instortingen van constructies?
4. Welke oplossingen reikt de Eurocode aan om disproportionele instortingen te voorkomen?
5. Hoe werkt een tweede draagweg?

3.1 Nederlandse regelgeving over robuustheid

In Nederland zijn de opdrachtgevers die te maken hebben met het (ver)bouwen van bouwwerken gebonden aan Bouwbesluit 2012. Dit besluit geeft een overzicht van bouwtechnische voorschriften die gehanteerd dienen te worden bij het (ver)bouwen van bouwwerken.

Sinds 2012 verwijst het Bouwbesluit naar Eurocodes. Eurocodes zijn Europese normen voor het toetsen en beoordelen van de constructieve veiligheid van diverse nieuwbouwconstructies. Deze normen gelden in heel Europa. Landelijke verschillen worden in nationale bijlagen vastgelegd. Niet alle normdelen van de Eurocode worden door het Bouwbesluit aangewezen. Niet aangewezen normdelen zijn niet wettelijk verplicht.

Voor dit afstudeeronderzoek zijn de volgende Eurocodes bestudeerd:

- NEN-EN 1990: *Grondslagen van het constructief ontwerp*
- NEN-EN 1991-1-1: *Belastingen op constructies*
- NEN-EN 1991-1-7: *Buitengewone ontwerpsituaties*

Bouwbesluit 2012

Technische voorschriften die betrekking hebben op de constructieve veiligheid van bouwwerken staan in het Bouwbesluit beschreven in Hoofdstuk 2: *Technische bouwvoorschriften uit het oogpunt van veiligheid*. Voor dit afstudeeronderzoek is met name Afdeling 2.1, *Algemene sterkte van de bouwconstructie* van belang. Zo vermeldt het aansturingsartikel van deze afdeling het volgende:

“Een te bouwen bouwwerk is voldoende bestand tegen de daarop werkende krachten.”

Met *werkende krachten* worden belastingen bedoeld waarbij het Bouwbesluit onderscheid maakt tussen fundamentele en buitengewone belastingen. Aangezien het begrip *robuustheid* betrekking heeft op weerstand bieden bij onvoorziene omstandigheden, is de regelgeving voor de buitengewone belastingcombinaties voor dit onderzoek het meest van belang. Zo luidt artikel 2.3 als volgt:

“Een bouwconstructie bezwijkt niet bij de buitengewone belastingcombinaties als bedoeld in NEN-EN 1990, als dit leidt tot het bezwijken van een andere bouwconstructie die niet in de directe nabijheid ligt van die bouwconstructie. Daarbij wordt uitgegaan van de bekende buitengewone belastingen als bedoeld in NEN-EN 1991.”

Bovenstaande formulering beschrijft het begrip *robuustheid*. Het Bouwbesluit verwijst hier expliciet naar weerstand bieden tegen onvoorziene omstandigheden met *bekende* oorzaken, *onbekende* oorzaken benoemt het besluit niet. De Eurocode benoemt de onbekende oorzaak wél.

Eurocode

Algemene eisen die betrekking hebben op de constructieve veiligheid van bouwwerken staan in NEN-EN 1990 beschreven in Hoofdstuk 2: *Eisen*. Zo vermeldt paragraaf 2.1 *Fundamentele eisen* het volgende:

“Een constructie moet zijn berekend en ontworpen om voldoende constructieve weerstand, bruikbaarheid en duurzaamheid te bezitten.”

De formulering *voldoende constructieve weerstand* wordt in dezelfde paragraaf als volgt toegelicht:

“Een constructie dient zodanig ontworpen en uitgevoerd te zijn, dat zij niet disproportioneel zal worden beschadigd bij voorvallen als ontploffingen, schokbelastingen en de gevolgen van menselijke fouten.”

Ook bovenstaande formulering beschrijft het begrip *robuustheid*. Waar in het Bouwbesluit expliciet verwezen wordt naar de beschouwing van de bekende oorzaken, introduceert de Eurocode in bovenstaande formulering mede de beschouwing van de onbekende oorzaak, namelijk de gevolgen van menselijke fouten. Aangezien het Bouwbesluit leidend is, is de beschouwing van de onbekende oorzaak niet wettelijk verplicht.

3.2 Disproportionele schade

Waar de term robuustheid voornamelijk behandeld wordt in NEN-EN 1991-1-7, wordt de term, al dan niet letterlijk in de tekst, in NEN-EN 1990 ook al in een vrij vroeg stadium beschouwd, namelijk:

NEN 1990, 2.1. (4)P: “Een constructie moet zodanig ontworpen en uitgevoerd zijn dat zij niet zal worden beschadigd in een mate die niet in verhouding staat tot de aanvankelijke oorzaak.”

Een beschadiging die niet in verhouding staat met de aanvankelijke oorzaak wordt ook wel disproportionele schade genoemd. De term ‘disproportioneel’ is in de Eurocode niet nader gedefinieerd en geeft de constructeur ruimte voor eigen interpretatie.

In de TGB 1990 werd de term *disproportioneel* niet letterlijk gebruikt, maar werd er wel een definitie gegeven voor de mate van schade die aanvaardbaar was. De schade moest namelijk beperkt blijven tot het *primair belaste constructiedeel zelf* en die delen die daar *direct* op aansluiten.

Volgens het Bouwbesluit 2012 mag een constructieonderdeel bezwijken als het bezwijken van andere onderdelen beperkt blijft tot de direct aangesloten delen.

§3.5 *Ontwerpstrategieën* behandelt strategieën die de NEN-EN 1991-1-7 aanreikt om disproportionele instorting als gevolg van buitengewone belastingen te voorkomen. De term *disproportioneel* is voor beide strategieën onbegrensd. Wat bij de strategie, die gebaseerd is op de onbekende oorzaak *wel* vermeld wordt, is dat een significant deel van het bouwwerk mag bezwijken bij het willekeurig verwijderen van steunpunten zoals kolommen en wanden. Hierbij reikt de norm een indicatieve grens voor lokaal bezwijken aan, namelijk de kleinste waarde van 100 m² of 15 % van de vloeroppervlakte van twee aangrenzende vloervelden.

3.3 Belastingcombinaties

Zoals in §3.1 *Nederlandse regelgeving over robuustheid* reeds aangehaald is, dient een constructie volgens het Bouwbesluit voldoende bestand te zijn tegen de daarop werkende belastingen. Voor zowel de fundamentele als de buitengewone belastingcombinaties verwijst het Bouwbesluit naar de Eurocode.

Belastingcombinaties bestaan uit belastingen en belastingsfactoren, zie *Figuur 2*. Belastingen onderscheiden zich in permanente (G), tijdelijke (Q) en bijzondere belastingen (A).

Belastingsfactoren onderscheiden zich in partiële factoren (γ) en momentaanfactoren (ψ). De momentaanfactor omvat de kans van optreden van belasting en is, op twee vloervelden na, altijd kleiner dan 1. De partiële factor omvat de onzekerheid in grootte van de belasting en is, in ongunstige gevallen, groter dan 1. Een overzicht van deze factoren is terug te vinden in *Bijlage A1* van NEN-EN 1990.

The diagram shows the formula for a permanent load combination:
$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$
 Above the formula, arrows point from the terms $\gamma_{G,j}$, $\gamma_{Q,1}$, $\psi_{0,1}$, $\gamma_{Q,i}$, and $\psi_{0,i}$ to a horizontal line labeled 'factoren'. Below the formula, arrows point from the terms $G_{k,j}$, $Q_{k,1}$, and $Q_{k,i}$ to a horizontal line labeled 'belastingen'.

Figuur 2: Belastingcombinatie, blijvend, UGT (vergelijking 6.10a)

De factoren komen voort uit verschillende variabelen. Zo is een belastingcombinatie afhankelijk van:

- de ontwerpsituatie
- de grenstoestand
- de gevolgklasse

3.3.1 Ontwerpsituatie

Wanneer de weerstand van een constructie getoetst wordt, dient er onderscheid gemaakt te worden tussen verschillende ontwerpsituaties, te weten: blijvende, tijdelijke, buitengewone en aardbevingsontwerpsituaties. Blijvende ontwerpsituaties worden berekend voor de omstandigheden bij normaal gebruik. Tijdelijke ontwerpsituaties dienen berekend te worden tijdens de uitvoering of het herstel van bouwwerken. Buitengewone ontwerpsituaties verwijzen naar de omstandigheden bij uitzonderlijke gebeurtenissen. De omstandigheden voor aardbevingsituaties spreken voor zich.

Dit afstudeeronderzoek richt zich op de verschillen tussen blijvende en buitengewone ontwerpsituaties. Tijdelijke en aardbevingsontwerpsituaties zijn buiten beschouwing gelaten.

3.3.2 Grenstoestand

Bij het toetsen van constructies wordt er onderscheid gemaakt tussen het toetsen van:

- de uiterste grenstoestand (UGT) en
- de bruikbaarheidsgrenstoestand (BGT).

Wanneer een constructie getoetst wordt in de uiterste grenstoestand, wordt er gekeken naar de sterkte van de constructie. Wanneer de UGT overschreden wordt, treden er in de constructie blijvende vervormingen op die kunnen leiden tot scheurvorming. Bij het toetsen op de bruikbaarheidsgrenstoestand wordt gekeken naar de vervormingen van de constructie. Normale doorbuigingen blijven hierbij beperkt en hebben geen blijvende invloed op de constructie.

Bij de buitengewone ontwerpsituatie wordt de constructie slechts op sterkte (UGT) getoetst, vervormingen (BGT) worden buiten beschouwing gelaten. Gesteld wordt dat de constructie in een buitengewone ontwerpsituatie niet mag bezwijken (dus voldoende sterkte moet bezitten), maar wel mag vervormen, ook als de constructie hierdoor zijn bruikbaarheid verliest. Hierdoor kunnen constructies in de buitengewone ontwerpsituatie lichter gedimensioneerd worden.

3.3.3 Gevolgklassen

Gevolgklassen, ook wel consequence classes (CC), zijn ingevoerd om het verschil in grootte tussen diverse bouwwerken in de constructieve berekening mee te nemen. Deze gevolgklassen zijn gebaseerd op de impact van de gevolgen van het bezwijken van de constructie. Denk hierbij aan zowel economische als maatschappelijke schade. Zie *Tabel 1*: Definitie van gevolgklassen voor de omschrijving van de gevolgklassen, overgenomen uit de nationale bijlage van NEN 1990 (Tabel NB.20 - B1). Hierbij geldt: hoe hoger de gevolgklasse, des te groter de partiële factoren, des te groter de rekenwaarde van de belasting.

Tabel 1: Definitie van gevolgklassen

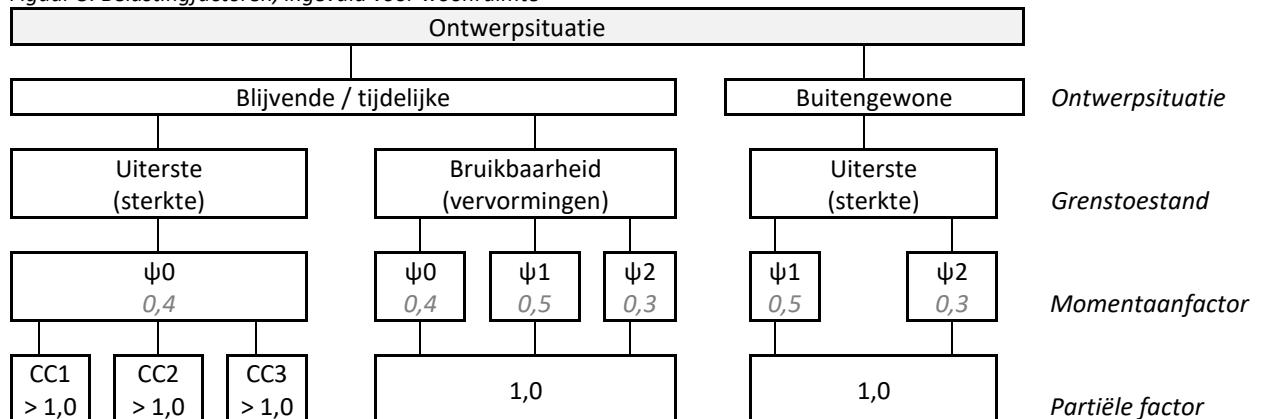
Gevolgklasse	Omschrijving
CC3	<i>Grote</i> gevolgen ten aanzien van het verlies van mensenlevens en/of <i>zeer grote</i> economische of sociale gevolgen of gevolgen voor de omgeving.
CC2	<i>Middelmatige</i> gevolgen ten aanzien van het verlies van mensenlevens en/of <i>aanzienlijke</i> economische of sociale gevolgen of gevolgen voor de omgeving.
CC1	<i>Geringe</i> gevolgen ten aanzien van het verlies van mensenlevens en/of <i>kleine</i> of <i>verwaarloosbare</i> economische of sociale gevolgen of gevolgen voor de omgeving.

3.3.4 Conclusie

Uit voorgaande paragrafen blijkt dat de belasting waarmee gerekend dient te worden afhankelijk is van een hoop factoren, zie *Figuur 3*. Factoren die groter zijn dan 1,0 werken ongunstig (ophoging belasting) en factoren die kleiner zijn dan 1,0 werken gunstig.

In dit afstudeeronderzoek wordt onderzocht in hoeverre deze factoren in de blijvende en de buitengewone ontwerpsituatie invloed hebben op de constructie. Uiteindelijk zullen de verschillen in *H6 Kwantitatieve beschouwing* in beeld worden gebracht.

Figuur 3: Belastingfactoren, ingevuld voor woonruimte



3.4 Instortingen

Bij de zoektocht naar oplossingen voor het voorkomen van disproportionele instortingen van constructies, is het van groot belang inzicht te krijgen in de oorzaken van deze instortingen. J. De Boer benoemt in zijn afstudeerrapport (De Boer, 2012) het begrip *voortschrijdende instorting*. Dit is een instorting waarbij het bezwijken en/of wegvallen van een enkel constructie-element zorgt voor het bezwijken van een groter deel van de constructie. Door dit mechanisme staat de aanvankelijke oorzaak (de reden waarom het enkele element instort) niet in verhouding met de algehele instorting en is de instorting dus disproportioneel. In het afstudeerrapport worden zes instortingsvormen omschreven:

- domino-instorting;
- pannenkoekinstorting;
- ritsinstorting;
- doorsnede-instorting;
- instabiliteitsinstorting; en
- een combinatie van bovenstaande.

In *H6 Kwantitatieve beschouwing* wordt nader ingegaan op een buitengewone ontwerpsituatie waarbij één enkele kolom wegvalt. De instortingsvormen die hierbij kunnen optreden zijn de pannenkoek-, de doorsnede- en de instabiliteitsinstorting.

Pannenkoekinstorting

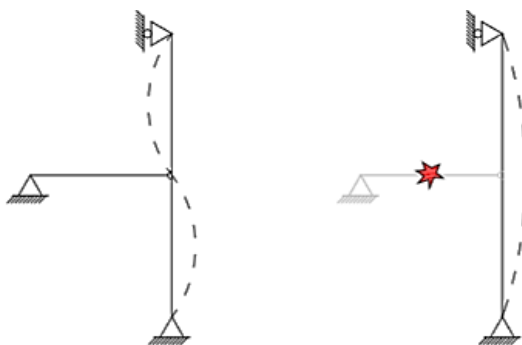
Wanneer een verticaal dragend element – bijvoorbeeld een kolom – bezwijkt, verliest het zijn dragende functie en zal de bovenliggende vloer of het bovenliggende dak ook naar beneden komen. De onderliggende vloer krijgt hiermee een extra verticale belasting en kan om die reden ook bezwijken. Hierdoor vindt verticale voortschrijdende instorting plaats oftewel een pannenkoekinstorting.

Doorsnede-instorting

Waar de pannenkoekinstorting betrekking heeft op de gehele constructie, heeft een doorsnede-instorting slechts betrekking op één constructie-element. Wanneer de doorsnede van een element volledig op trek benut is, heeft dit element nauwelijks reserve. Bij het ontstaan van een klein scheurtje kan er op deze locatie geen spanning worden opgenomen. De rest van de doorsnede moet de overgebleven spanning opvangen. Aangezien de doorsnede volledig benut is, kan de resterende kracht niet worden opgenomen. De scheur zal blijven groeien en het element kan bezwijken.

Instabiliteitsinstorting

Bij een constructie met doorlopende kolommen zullen de horizontale elementen (bijvoorbeeld liggers) die aan de kolommen bevestigd zijn, dienen als kniksteunen. Wanneer één van de liggers bezwijkt, zal de kniksteun voor de kolom wegvallen wat leidt tot een grotere kniklengte. De doorsnede is hier vaak niet op berekend en zal als het gevolg van instabiliteit bezwijken. Het principe is weergegeven in *Figuur 4: Instabiliteitsinstorting*.

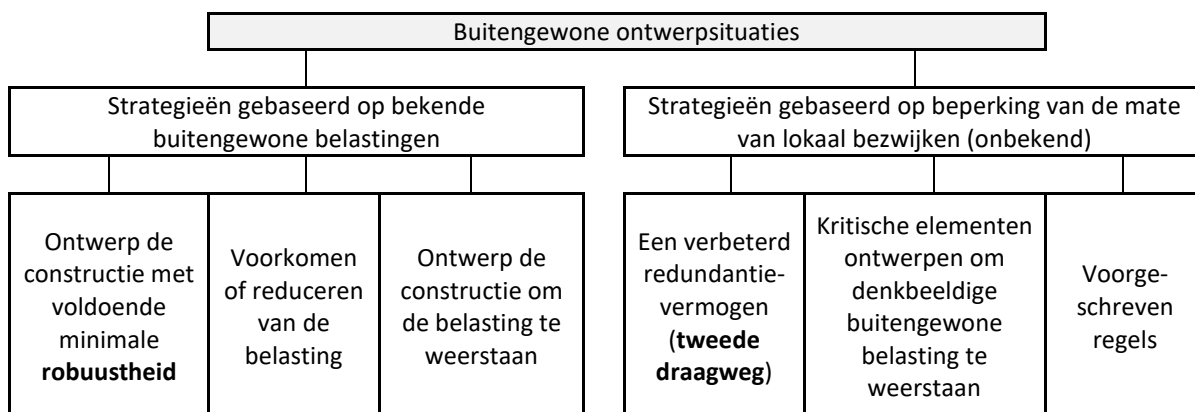


Figuur 4: Instabiliteitsinstorting (De Boer, 2012)

3.5 Ontwerpstrategieën

Uit voorgaande paragraaf komt naar voren dat het bezwijken van een constructie verschillende oorzaken kan hebben. NEN-EN 1991-1-7 biedt verschillende strategieën die gebruikt kunnen worden om een constructie tegen deze oorzaken te beschermen, om disproportionele instorting te voorkomen.

Figuur 5: Strategieën voor buitengewone ontwerpsituaties toont een overzicht van deze strategieën met daarbij de methoden die per strategie te hanteren zijn.



Figuur 5: Strategieën voor buitengewone ontwerpsituaties

Strategieën gebaseerd op bekende buitengewone belastingen

Om het risico te beperken dat een bekende buitengewone belasting optreedt, behoort er minimaal één van de bovenstaande maatregelen genomen te worden. Aan de eerstgenoemde maatregel, de constructie ontwerpen met voldoende robuustheid, kan volgens de norm voldaan worden wanneer er gebruikt wordt gemaakt van minimaal één van de volgende methoden:

1. ontwerp stabiliserende onderdelen als kritische elementen;
2. ontwerp constructieve elementen en kies materialen met voldoende ductiliteit;
3. voorzie de constructie van voldoende redundantie³ om na een buitengewone gebeurtenis het afdragen van belasting via een tweede draagweg mogelijk te maken.

Volgens het Bouwbesluit dient een constructeur bij buitengewone ontwerpsituaties slechts uit te gaan van belastingen als bedoeld in NEN-EN 1991. De nationale bijlage van NEN-EN 1991-1-7 geeft een opsomming van de belastingen die beschouwd moeten worden als bekende buitengewone belasting. De te beschouwen belastingen zijn afhankelijk van onder andere de kans dat de belasting optreedt en de gevolgen van bezwijken. Voorbeelden van deze belastingen zijn aanrijdingen (stootbelastingen) en explosies (ontploffingen).

Strategieën gebaseerd op beperking van de mate van lokaal bezwijken (onbekende belasting)

In tegenstelling tot de voorgaande strategie, zijn de belastingen bij deze strategie onbekend en behoren mogelijkheden tot *bezwijken* te zijn beperkt. De mogelijke methoden zijn weergegeven in *Figuur 5: Strategieën voor buitengewone ontwerpsituaties*.

Daar waar NEN 1991-1-7 wel methoden aanreikt, geeft de norm *niet* aan waar de keuze voor de methode van afhankelijk is. Bovendien is de aanvullende bijlage, *Bijlage A: Ontwerp voor de gevolgen van lokaal bezwijken van gebouwen door een onbekende oorzaak*, slechts informatief dus ook niet geldend voor andere Europese landen. Een opvallende vermelding in deze bijlage luidt als volgt: “*Er is een voornemen de komende jaren met andere en meer bruikbare suggesties te komen.*” Deze opmerking vormt mede de aanleiding van dit afstudeeronderzoek. In *H4 Praktijkonderzoek* wordt nader onderzocht er in de praktijk wordt omgegaan met de beschouwing van de onbekende belasting.

³ De mate waarin een constructie, bij het bezwijken van een onderdeel, voor een tweede draagweg kan zorgen.

3.6 Gebruik van gevolklassen

Volgens paragraaf 3.4 van NEN-EN 1991-1-7 *mogen* de strategieën voor buitengewone ontwerpsituaties zijn gebaseerd op de gevolklassen zoals beschreven in 3.3.3 *Gevolklassen*. Deze paragraaf benoemt per klasse of een **beschouwing** van de buitengewone ontwerpsituatie noodzakelijk is.

Dit afstudeeronderzoek behandelt slechts de strategieën voor de buitengewone belastingen met een onbekende oorzaak. Voor een nadere uitwerking hiervan verwijst de norm naar de informatieve bijlage A. In deze bijlage wordt per gevolgklasse beschreven hoe een constructie van **voldoende robuustheid** voorzien kan worden. In een opmerking op deze bijlage staat geschreven dat de bijlage, ondanks de informatieve status, bruikbare constructieve suggesties bevat voor een robuust ontwerp. In de volgende paragrafen staat per gevolgklasse beschreven hoe het constructieve ontwerp, ten aanzien van onbekende buitengewone belastingen, beschouwd dient te worden en hoe de constructie van voldoende robuustheid kan worden voorzien. Hierbij wordt uitgegaan dat de constructie ontworpen is met voldoende stabiliteit in de blijvende ontwerpsituatie.

3.6.1 Gevolgklasse CC3

Beschouwing

Om het vereiste betrouwbaarheidsniveau te bepalen, dient een onderzoek naar het specifieke geval te zijn uitgevoerd, bijvoorbeeld de gevolgen van het bezwijken van een kolom door een onbekende oorzaak. Het kan hierbij noodzakelijk zijn dat een risicoanalyse wordt uitgevoerd, de norm geeft hierbij niet aan *wanneer* dit noodzakelijk is. Ook dient er gebruik gemaakt te worden van gedetailleerde berekeningsmethoden. Hierbij worden voorbeelden genoemd zoals dynamische berekeningen en niet-lineaire rekenmodellen. De invulling voor deze berekeningen is niet gegeven.

Voldoende robuustheid (informatief)

Er behoort een systematische risicoanalyse van het gebouw te zijn uitgevoerd, waarbij met zowel voorziene als onvoorziene dreigingen rekening is gehouden. De invulling van de systematische risicoanalyse is niet gegeven.

3.6.2 Gevolgklasse CC2

Beschouwing

Afhankelijk van de specifieke omstandigheden van de constructie, bijvoorbeeld het bezwijken van een kolom door een onbekende oorzaak, mag een vereenvoudigde berekening met modellen met equivalente belastingen⁴ zijn gebruikt of mogen voorgeschreven ontwerp- of detailleringsregels zijn toegepast.

Voldoende robuustheid (informatief)

In Bijlage A.3: *Gevolklassen voor gebouwen* wordt er voor gevolgklasse 2 onderscheid gemaakt tussen een lage risicogroep, CC2a, en een hoge risicogroep, CC2b. Het onderscheid tussen deze twee groepen is gebaseerd op de functie van het gebouw in combinatie met het aantal bouwlagen en de grootte van het vloeroppervlak per bouwlaag. De indeling van gevolklassen is gegeven in de nationale bijlage van NEN-EN 1991-1-7 (Tabel NB.5 - A.1). Het onderscheid tussen deze twee klassen heeft enkel invloed op de te nemen maatregelen voor wat betreft robuustheid, maatregelen die slechts in de informatieve bijlage A behandeld wordt.

⁴ Een equivalente belasting is een vervangende belasting gelijkwaardig aan de oorspronkelijke belasting. Een voorbeeld van equivalente belasting is de hoekverdraaiing in een knoop die door een verdeelde belasting veroorzaakt wordt. De verdeelde belasting wordt hierbij niet op het element gezet maar de berekende hoekverdraaiingen worden wel in de knoop geplaatst.

CC2b

Gebruik van één van de twee onderstaande maatregelen zorgt voor een robuuste CC2b-constructie:

- Het toepassen van effectieve horizontale trekbanden in combinatie met verticale trekbanden in alle dragende kolommen en wanden.
- Het controleren of de stabiliteit van het gebouw is verzekerd en of lokale schade *een bepaalde grens* niet overschrijdt bij denkbeeldige verwijdering van:
 - o iedere dragende kolom en iedere ligger die een kolom ondersteunt;
 - o een willekeurig deel van een dragende wand, telkens één deel per verdieping van het gebouw.

Waar de denkbeeldige verwijdering van dergelijke kolommen en delen van wanden resulteren in een schade groter dan de afgesproken grens, of dan een andere als zodanig voorgeschreven grens, behoren dergelijke elementen te zijn ontworpen als **'kritisch element'**.

De *bepaalde* en *afgesproken* grens is door de norm niet gedefinieerd en dient in overeenstemming met de desbetreffende overheidsinstantie bepaald te worden. De laatstgenoemde maatregel beschrijft de toepassing van de tweede draagweg.

CC2a

Gebruik van één van de twee onderstaande maatregelen zorgt voor een robuuste CC2b-constructie:

- het toepassen van effectieve horizontale trekbanden;
- het toepassen van effectieve verankering van verhoogde vloeren aan wanden.

Een beschouwing van de buitengewone ontwerpsituatie voor CC1-constructies is niet noodzakelijk. De norm vermeldt hier niets over.

3.6.3 Conclusie

De maatregelen die de norm noemt om een CC3-constructie van voldoende robuustheid te voorzien, behoeven nog enige opheldering. De voorraad van bouwwerken die, volgens de definitie van CC3, bij het bezwijken grote economische en sociale gevolgen heeft, is in Nederland schaars. Het grootste deel van de gebouwvoorraad bestaat uit CC2- en CC1-constructies. Aangezien de robuustheid van CC1-constructies volgens de Eurocode niet beschouwd hoeft te worden, richt dit rapport zich hoofdzakelijk op de robuustheidsmaatregelen voor CC2-constructies.

Eén van de maatregelen om een CC2-constructie van voldoende robuustheid te voorzien, is het controleren van de stabiliteit en het nagaan van de lokale schade van een gebouw wanneer een dragende kolom fictief wordt weggehaald. Hierbij dient er voor iedere kolom een alternatieve krachtsafdracht, ofwel een tweede draagweg berekend te worden.

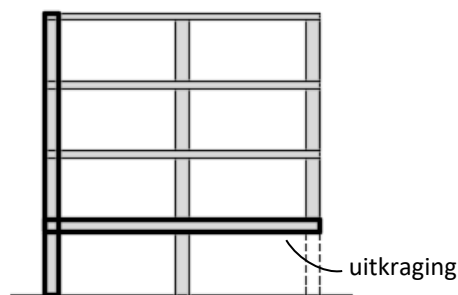
In *H6 Kwantitatieve beschouwing* wordt voor een zestal ontwerpsituaties een tweede draagweg berekend. Hierbij wordt de impact van het extra benodigde aantal kilo's staal voor zowel een CC2- als een CC3-constructie berekend.

3.7 Tweede draagweg

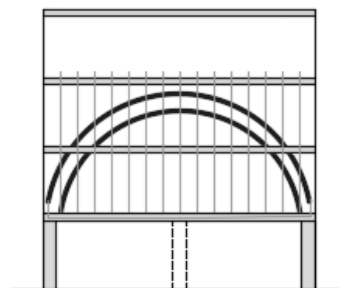
Zoals in de vorige paragraaf reeds is ingeleid, is de toepassing van een tweede draagweg een mogelijkheid om een constructie van voldoende robuustheid te voorzien. De constructie wordt dan ontworpen met een ingebouwde veiligheid, zodat een alternatieve krachtsafdracht plaats kan vinden. Denk hierbij aan het toepassen van zwaardere staalprofielen en extra wapening in betonelementen.

Verschillende afstudeerrapporten benoemen oplossingen om de kracht, bij het wegvallen van een dragend element, via een alternatieve route af te dragen. Hieronder volgt een opsomming van de oplossingen die in de rapporten het meest voorgedragen worden:

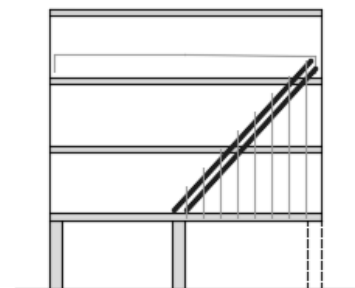
- Toepassen van horizontale, diagonale en verticale trekbanden (zie 3.7.1 *Trekbanden*).
- Toepassen van versterkte stroken: ter plaatse van de bezweken kolom wordt het steunpunt vervangen door een versterkte strook (extra wapeningsstaal of stalen ligger) in het vloerveld. Dit geldt niet voor een hoekkolom.
- Toepassen van cantileverwerking: wanneer een hoekkolom uitvalt kan een vloer (of een balk) berekend worden als uitkraging, ofwel cantilever, zoals *Figuur 6: Cantileverwerking*.
- Gebruik maken van het wandligger-mechanisme: de wanden werken samen als schijf, die zich vanwege de grote hoogte stijf gedragen, zoals *Figuur 7: Wand-ligger mechanisme*.



Figuur 6: Cantileverwerking

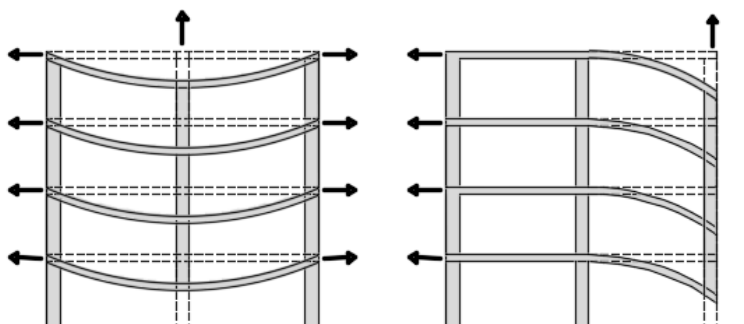


Figuur 7: Wand-ligger mechanisme



3.7.1 Trekbanden

Een veelvoorkomende eis, zoals bijlage A van NEN-EN 1991-1-7 stelt, is het toepassen van trekbanden. *Figuur 8: Principe trekbanden tussenkolom (a) eindkolom (b)* toont een constructie, waarbij in beide gevallen de onderste kolom bezweken is.

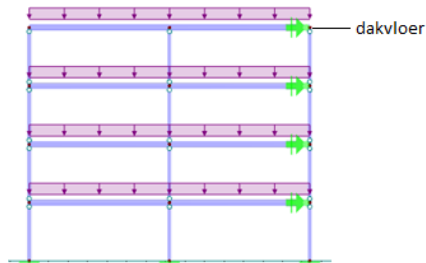


Figuur 8: Principe trekbanden tussenkolom (a) eindkolom (b)

Bij geval a is de tussenkolom weggefallen. Wanneer men in de vloeren een kabel spant, oftewel een trekband, en deze aan allebei de kanten aantrekt, zullen de vloeren minder vervormen. Wanneer men in alle tussenkolommen een kabel spant en deze aan het uiteinde aantrekt, zullen de vloeren, in combinatie met de horizontale kabel, ook minder vervormen. Dit principe geldt ook voor geval b.

3.7.2 Rekenmethodiek

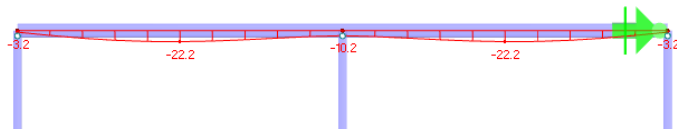
In de voorgaande paragrafen is reeds gesproken over het beschermen van gebouwen in buitengewone ontwerpsituaties⁵. Een gevolg van een buitengewone belasting is het bezwijken van een dragend element, zoals een kolom. Ter introductie van de tweede draagweg wordt middels een eenvoudige mechanisch model, *Figuur 9: Basismodel in RFEM*, het gedrag van de constructie ten gevolge van een kolombezwijking in beeld gebracht.



Figuur 9: Basismodel in RFEM, blijvende ontwerpsituatie

De constructie is in eerste instantie berekend in de blijvende “normale” ontwerpsituatie. De berekende staalprofielen ter plaatse van de dakvloer zijn:

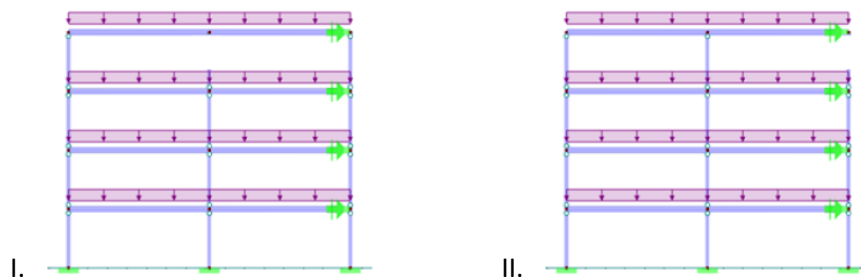
- Dakligger: HE320A
- Eindkolommen: HE140A
- Tussenkolom: HE200A



Figuur 10: Dakvloer blijvende ontwerpsituatie

Om de impact van het verwijderen van een steunpunt (kolom) weer te geven, worden twee buitengewone ontwerpsituaties gecreëerd, volgens *Figuur 11: Buitengewone ontwerpsituatie I & II*:

- Ontwerpsituatie I: bezwijken tussenkolom
- Ontwerpsituatie II: bezwijken eindkolom



Figuur 11: Buitengewone ontwerpsituatie I & II

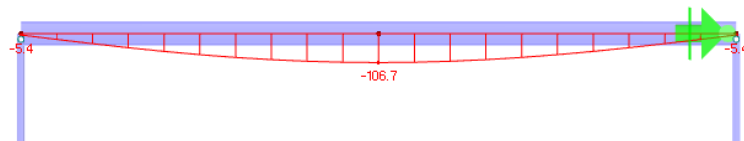
Vervolgens wordt de constructie berekend volgens de twee buitengewone ontwerpsituaties. Beide gevallen hebben impact op de bestaande constructie.

- Situatie I: Door het wegvallen van een tussenkolom dient de dakligger een grotere afstand te overbruggen. (Zie *Figuur 12: Dakvloer buitengewone ontwerpsituatie I*)
- Situatie II: Door het wegvallen van een eindkolom ontstaat er een uitkraging. (Zie *Figuur 13: Dakvloer buitengewone ontwerpsituatie II*)

⁵ De ontwerpsituaties worden nader uitgelegd in §3.3.1 *Ontwerpsituatie*.

De berekende staalprofielen ter plaatse van de dakvloer, volgens *Figuur 12*, in de buitengewone ontwerpsituatie I zijn:

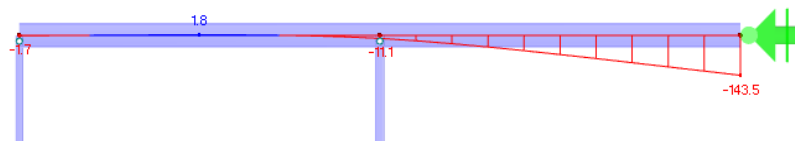
- Dakligger: HE500A
- Eindkolommen: HE160A



Figuur 12: Dakvloer buitengewone ontwerpsituatie I

De berekende staalprofielen ter plaatse van de dakvloer, volgens *Figuur 13*, in de buitengewone ontwerpsituatie II zijn:

- Dakligger: HE500A
- Eindkolom: HE140A (praktisch)
- Tussenkolom: HE200A



Figuur 13: Dakvloer buitengewone ontwerpsituatie II

Tabel 2 geeft een overzicht van de staalprofielen ter plaatse van de dakvloer in de drie berekende ontwerpsituaties. In de tabel is de impact van een buitengewone belasting op de constructie direct zichtbaar. De dakliggers zijn in de buitengewone ontwerpsituatie flink forser dan in de blijvende ontwerpsituatie.

Tabel 2: Overzicht staalprofielen

Ontwerpsituatie	Dakligger	Eindkolom (links)	Tussenkolom	Eindkolom (rechts)
Blijvend	HE320A	HE140A	HE200A	HE140A
Buitengew. I	HE500A	HE140A	-	HE160A
Buitengew. II	HE500A	HE140A	HE200A	-

Door de lagere veiligheidsfactoren die in de buitengewone ontwerpsituatie gehanteerd worden, is de impact op de kolommen minder dan bij de liggers.

Tweede draagweg

Een ontwerpmaatregel om de constructie te beschermen tegen voortschrijdende instorting bij het bezwijken van een dragend element, is het toepassen van een tweede draagweg. De constructie wordt dan ontworpen met een ingebouwde veiligheid, zoals het toevoegen van wapeningsstaal of het verzwaren van de staalprofielen, zoals in het voorbeeld hierboven. Door in het basisontwerp de dakligger HE320A te vervangen door een HE500A, is het dak ontworpen met ingebouwde veiligheid en zal het niet disproportioneel bezwijken bij het wegvallen van een kolom door een onbekende buitengewone belasting.

In §6 *Kwantitatieve beschouwing* wordt de tweede draagweg bij een zestal buitengewone ontwerpsituaties op een stalen raamwerk getoetst. Bij de beschouwing worden diverse oplossingen voor een alternatieve krachtafdracht binnen het raamwerk onderzocht. Hierbij wordt de impact op het raamwerk in de blijvende situatie weergegeven in extra kilo's staal die benodigd zijn om een ingebouwde veiligheid te creëren.

3.8 Beantwoording deelvragen

1. Wat zegt de Nederlandse regelgeving over robuustheid?

Volgens het Bouwbesluit mag een bouwconstructie bij buitengewone belastingcombinaties niet bezwijken als dit leidt tot het bezwijken van een andere bouwconstructie die *niet* in de directe nabijheid ligt van die bouwconstructie. Hierbij wordt enkel uitgegaan van buitengewone belastingen die de Eurocode formuleert in NEN-EN 1991. De ontwerpstrategieën behorend bij belastingen met een bekende oorzaak staan beschreven in NEN-EN 1991-1-7. Het Bouwbesluit benoemt de beschouwing van de onbekende belasting *niet*.

2. Wanneer is een instorting disproportioneel?

De term *disproportioneel* wordt in het Bouwbesluit niet genoemd. Zoals in bovenstaand antwoord reeds is aangehaald, vermeldt het besluit dat een constructieonderdeel slechts mag bezwijken als het bezwijken van andere onderdelen beperkt blijft tot de direct aangesloten delen. Dit zou men als een definitie van disproportioneel kunnen lezen.

De Eurocode benoemt de term wel, maar definieert en begrenst het niet. De norm reikt hierbij *wel* een indicatieve grens aan voor aanvaardbare lokale beschadiging.

3. Wat is er bekend over de oorzaak van disproportionele instortingen van constructies?

Disproportionele instortingen worden doorgaans veroorzaakt door voortschrijdende instortingen.

Voorbeelden van voortschrijdende instortingen zijn:

- domino-instorting;
- pannenkoekinstorting;
- ritsinstorting;
- doorsnede-instorting;
- instabiliteitsinstorting; en
- een combinatie van bovenstaande.

4. Welke oplossingen reikt de Eurocode aan om disproportionele instortingen als gevolg van buitengewone belastingen te voorkomen?

De Eurocode benoemt in NEN-EN 1991-1-7 enkele strategieën om disproportionele instorting als gevolg van buitengewone belastingen te voorkomen. Hierbij wordt er onderscheid gemaakt tussen buitengewone belastingen met een bekende oorzaak en buitengewone belastingen met een onbekende oorzaak. De aanbevolen strategieën staan vermeld in *Figuur 5: Strategieën voor buitengewone ontwerpsituaties*.

5. Hoe werkt een tweede draagweg?

De constructie wordt ontworpen met een ingebouwde veiligheid, zodat een alternatieve krachtsafdracht plaats kan vinden. Denk hierbij aan het toepassen van zwaardere staalprofielen en extra wapening in betonelementen. De tweede draagweg wordt geactiveerd wanneer er een buitengewone ontwerpsituatie ontstaat. De extra dimensionering van een staalprofiel of de extra wapeningsstaven gaan dan zijn werk doen en meehelpen in de krachtsafdracht om de constructie niet te doen bezwijken.

4 PRAKTIJKONDERZOEK

Waar in het literatuuronderzoek de belangrijkste uitgangspunten soms letterlijk zijn overgenomen uit de norm, worden in dit praktijkonderzoek de discussiepunten hierover in kaart gebracht.

De grijze gebieden in de Eurocode en de discrepantie tussen de Eurocode en het Bouwbesluit zorgen voor veel discussies onder zowel toetsende als ontwerpende constructeurs. In dit onderzoek wordt er subjectief naar de discussiepunten rondom het onderwerp *robuustheid* gekeken en worden de meningen van de experts gehoord. De grijze gebieden worden vastgesteld aan de hand van afgenomen interviews met experts en middels artikelen uit vakbladen.

De meningen van de experts worden in *H5 Kwalitatieve beschouwing* geanalyseerd.

In het praktijkonderzoek wordt gezocht naar antwoord op de volgende deelvragen:

1. Waar schieten de bouwvoorschriften tekort met betrekking tot robuustheid?
2. Waar schieten constructeurs tekort met betrekking tot robuustheid?
3. Hoe kan een gebouw op robuustheid beoordeeld worden?
4. Hoe kan een constructie van voldoende robuustheid worden voorzien?
5. Wat zijn de moeilijkheden van gevolgsclassificatie?

4.1 Ondervraagde experts

Voor dit praktijkonderzoek zijn de meningen en visies van verschillende experts gehoord. Vanwege het geringe tijdsbestek waarin dit onderzoek tot stand wordt gebracht, is het aantal experts beperkt gebleven tot elf personen. Wanneer er in dit hoofdstuk gesproken wordt over een 'interview', wordt het interview bedoeld dat is afgelegd tussen februari en juni van dit jaar.

De volgende externe experts (gerangschikt op alfabetische volgorde) zijn geïnterviewd en hebben hiermee een bijdrage geleverd aan dit afstudeeronderzoek:

- Ing. D.C.W. Bezemer	Gemeente Rotterdam / COBc
- Ing. A. Borst	Gemeente Utrecht
- Dr. ir. drs. C.R. Braam	TU Delft / Adviesbureau ir. J.G. Hageman BV
- Ir. J. Galjaard	ABT Velp
- E.E.J.J. Philipsen	Gemeente Venlo
- F. Raijmakers	Gemeente Eindhoven
- F. de Roo	Strabag – Züblin
- Emeritus. prof.ir. A.C.W.M. Vrouwenvelder	TU Delft / TNO Bouw
- Emeritus. prof.dr.ir. J.C. Walraven	TU Delft
- Prof.ir. S.N.M. Wijte	TU Eindhoven / Adviesbureau ir. J.G. Hageman BV
- Ir. P.A.J.A.T. Willemen	Gemeente Rotterdam

De interviews zijn terug te lezen in Bijlage *B1 Interviews*. Ter verduidelijking zijn de namen van de experts met een blauwe kleur aangegeven.

4.2 Bouwvoorschriften

Zoals in de literatuurstudie reeds is aangegeven, dienen de normdelen van de Eurocode gehanteerd te worden indien ze door het Bouwbesluit 2012 zijn aangewezen. De regelgeving uit informatieve bijlagen en niet aangewezen normdelen uit de Eurocode zijn dus niet wettelijk niet geldend. Toch blijken de niet aangewezen voorschriften bruikbaar en volgens de experts is het dan ook een groot gemis dat deze regelgeving niet is aangewezen in het Bouwbesluit. Zo zegt de heer [Galjaard](#), voormalig voorzitter van VNconstructeurs: “Het is wettelijk bepaald dat het Bouwbesluit leidend is, toch schiet het met aanwijzingen naar de Eurocode tekort.” De ontbrekende verwijzing van het Bouwbesluit naar het beschouwen van buitengewone belastingen door een onbekende oorzaak is hier een voorbeeld van.

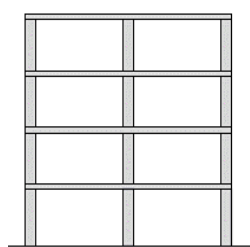
4.2.1 Tekortkoming Bouwbesluit 2012

Bouwvoorschriften zijn een middel om aannemelijk te maken dat bouwwerken voldoen aan de gestelde prestatie-eisen (Bezemer & Blom, 2016). Logischerwijs speelt de regelgeving een belangrijke rol als het gaat om veiligheid en kwaliteit van het bouwwerk, het gewenste veiligheidsniveau is immers in het Bouwbesluit vastgelegd. Maar uit verschillende rondetafelgesprekken is gebleken, dat “het puur en alleen focussen op het strikt voldoen aan de eisen in de normen ten koste gaat van de aandacht voor een degelijk ontwerp.” (Cement, 2016). Uit interviews met verschillende experts is duidelijk naar voren gekomen dat er kennis, kunde en gevoel nodig is om een constructief veilig gebouw neer te zetten. Ook benoemt de heer [Vambersky](#), voormalig docent aan de Technische Universiteit in Delft, in zijn artikel *Robuustheid van constructies* (Vambersky, 2015) de noodzaak dat iedereen moet beseffen dat het Bouwbesluit minimumeisen voorschrijft en zich vervolgens bij elke aanvraag moet afvragen of dat gewenst is.

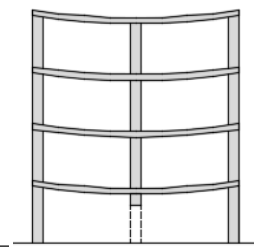
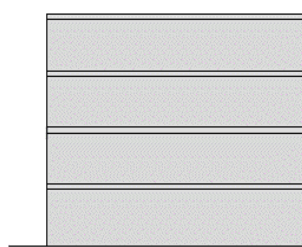
Veiligheid versus bruikbaarheid

In een interview met de heer [Walraven](#), voormalig docent aan de Technische Universiteit in Delft, wordt een andere tekortkoming van het Bouwbesluit aangehaald: “Het Bouwbesluit denkt voornamelijk aan veiligheid, maar verliest de bruikbaarheid daarbij weleens uit het oog.”

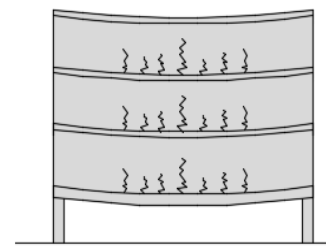
Hij benoemt als voorbeeld het weghalen van de onderste dragende wand in een constructie met een wandenstructuur: “Wanneer de onderste dragende wand wordt vervangen door een ligger die op doorbuiging voldoet (veiligheid), zullen de bovenliggende wanden toch scheuren vertonen vanwege het verschil in doorbuiging (bruikbaarheid).” Zie *Figuur 14* en *Figuur 15*.



Figuur 14: Constructie met wandenstructuur, doorsnede/aanzicht



Figuur 15: Constructie met wandenstructuur, doorsnede/aanzicht (wand vervangen door ligger)



4.2.2 Effectiviteit regels Eurocode

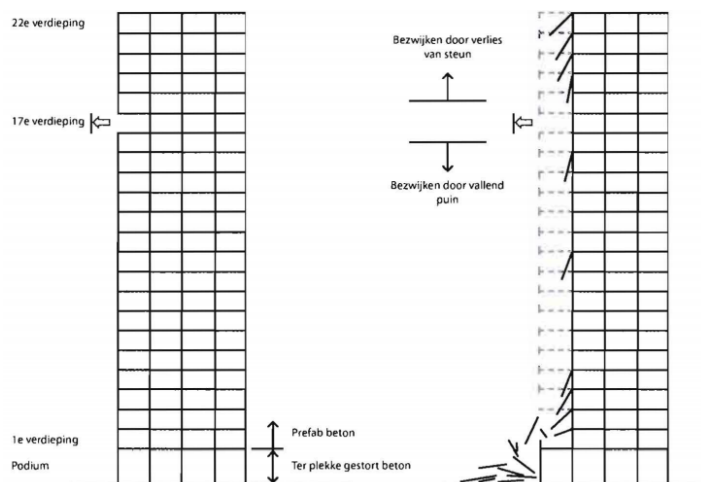
Waar het Bouwbesluit volgens experts tekortschiet in het aanwijzen van Eurocodes, schieten de Eurocodes op bepaalde vlakken tekort in de regelgeving zelf. Zo zegt de heer [Wijte](#) in zijn artikel *Eisen aan robuustheid* (Wijte S., 2015) dat er naast de discrepantie tussen de Eurocode en het Bouwbesluit, ook enige twijfel bestaat over de effectiviteit van de regels in de Eurocodes.

Een voorbeeld hiervan is de toepassing van key-elements, één van de mogelijke methoden om een constructie van voldoende robuustheid te voorzien. Bij deze methode worden constructieve stabiliserende elementen zo ontworpen, dat ze een buitengewone belasting (A_d) kunnen weerstaan. De aanbevolen belasting van A_d wordt gesteld op 34 kN/m^2 . Deze waarde is afkomstig van de gasdruk die ontstaan is bij de explosie in de Ronan Point, die een voortschrijdende instorting tot gevolg had, zie *Figuur 16: Schematische weergave instorting Ronan Point*.

Wijte noemt de toepassing van key-elements een ‘oneigenlijke’ methode: “Het lijkt een truc om het risico als gevolg van de gebeurtenis te tackelen.” De heren Bezemer en Willemen, toetsende constructeurs van Gemeente Rotterdam, sluiten hier volledig bij aan: “Bij robuustheid gaat het om samenhang en incasseringsvermogen. Stel je ontwerpt een kolom met de methode van key-elements, dan voldoet een kolom zonder enige aanpassingen, hij mag zelfs kleiner worden uitgevoerd. De kolom zou nog steeds kunnen bezwijken, ook al wordt hij gezien als key-element.”

Positieve impact Eurocode

Toch geven Wijte en Lurvink in het artikel *Op weg naar nieuwe generatie Eurocodes* (Wijte & Lurvink, 2016) toe dat de ontwikkeling van de Eurocode als een geweldige prestatie moet worden beschouwd. Deze mening onderbouwen ze met het feit dat de impact van de ontwikkeling van de Eurocode groot is: het dagelijks werk van circa 500.000 professionals in Europa wordt er door beïnvloed.



Figuur 16: Schematische weergave instorting Ronan Point (Dijk, 2011)

4.2.3 Oplossing eenduidigheid

Walraven stelt dat het één op één overnemen van de Eurocode in het Bouwbesluit de beste oplossing voor eenduidigheid zal zijn. Wel geeft hij toe dat dit waarschijnlijk niet mogelijk is, omdat het veiligheidsniveau per land verschillend is. Wijte voegt hieraan toe dat het gelijkstellen van verschillende interpretaties in Europa niet optimaal werkt, aangezien bouwwerken in bijvoorbeeld Engeland een andere bouwmethode en stabiliteitsbeschouwing hebben dan bouwwerken in Nederland. Ook benoemt hij de diversiteit in manieren waarop in verschillende landen met normen wordt omgegaan. In Engeland zijn de formuleringen uit de norm minder dwingend dan in Nederland, zo zegt hij: “In Engelse normen kom je regelmatig zinnen tegen in de trant van ‘je moet hieraan denken’, terwijl in Nederland en zeker ook in Duitsland de norm meer als een wet wordt beschouwd.” Een concrete oplossing voor eenduidigheid is uit de interviews niet naar voren gekomen. Wel blijkt uit verschillende artikelen dat verschillende werkgroepen hier actief mee bezig zijn.

4.2.4 Gevolgklassen

Hoewel de gevolgklassen in het Bouwbesluit géén rol spelen bij de beschouwing van de buitengewone belasting, is in de Eurocode de beschouwing van de buitengewone belasting met onbekende oorzaak *wél* gebaseerd op de gevolgklassen.

Zoals in het literatuuronderzoek reeds vermeld is, zijn gevolgklassen gebaseerd op de mate van schade die ontstaat bij het bezwijken van een constructie. In *Tabel 1* van het literatuuronderzoek is de definitie per gevolgklasse, zoals deze vermeld staat in NEN 1990, geformuleerd. De gevolgklassen onderscheiden zich in

- zeer grote gevolgen (CC3),
- aanzienlijke gevolgen (CC2) en
- geringe gevolgen (CC1).

Bovenstaande begrippen geven de constructeur ruimte voor eigen interpretatie. In een interview met de heer [Vrouwenvelder](#), voormalig docent aan de Technische Universiteit in Delft en TNO Bouw, geeft hij aan dat er bij het formuleren van de Eurocode en de Nederlandse Nationale Bijlage voornamelijk gedacht is aan de schade in absolute termen. De heer [Braam](#), docent aan de Technische Universiteit in Delft voegt hieraan toe: “Een constructeur is niet geïnteresseerd in alles wat er aan spiegelingen achter de klassen zit. De constructeur moet een constructie dimensioneren en wil weten welke belastingen en belastingfactoren van toepassing zijn en is niet bezig met subjectieve termen.”

Subjectieve definitie gevolgklassen

Buiten de *definitie* van de gevolgklassen, onderscheiden de klassen zich ook in de *voorbeelden van toepassingen* bij bouwwerken, zoals onderwijsgebouwen voor CC2 en eengezinswoningen voor CC1 (zie tabel NB.20 – *Definitie van gevolgklassen* uit NEN-EN 1990).

Het merendeel van de ondervraagden vindt de voorbeelden van de toepassingen per gevolgklasse toereikend genoeg en ervaart geen moeilijkheden bij het classificeren van bouwwerken.

Wanneer de gevolglassificatie van constructies geheel volgens de regels van de Eurocode geschiedt, blijft er toch nog ruimte voor eigen interpretatie. Zie bijvoorbeeld de formulering van één van de voorbeelden van toepassingen van een CC3-bouwwerk:

NEN 1990, Tabel NB.5 - A.1: *“Bouwwerken met de bestemming publieksfunctie (bijv. onderwijsgebouwen stadions, concerthallen, tribunes), waarbij in geval van bezwijken meer dan 500 personen gelijktijdig gevaar lopen.”*

De formulering *waarbij in geval van bezwijken meer dan 500 personen gelijktijdig gevaar lopen* kan op verschillende manier benaderd worden, en dan met name de term *gelijktijdig*. Ook [Vrouwenvelder](#) vindt het een ongelukkige term. Hij noemt als voorbeeld het bezwijken van een dak boven een theaterzaal; er lopen 500 mensen gevaar maar meestal zullen er geen 500 slachtoffers zijn. Hij vermeldt dat de omschrijving ‘gelijktijdig in gevaar lopen’ niet helder is en benadrukt de gedachtegang dat bij het ‘tellen’ de mensen die indirect gevaar lopen via voortschrijdende instorting ook meegeteld moeten worden. [Braam](#) ziet het gelijktijdig in gevaar lopen als volgt: er bezwijkt iets, hoeveel personen kunnen als gevolg daarvan direct letsel oplopen?

De norm bevat wat betreft de gevolglassificatie van bouwwerken verscheidene termen die ruimte geven voor eigen interpretatie. Voor een uitgebreid onderzoek naar hoe waterdicht de formuleringen zijn, zie Bijlage A1.2 *Regelgeving: gevolgklassen*.

4.3 Robuustheid in de praktijk

Zoals in de inleiding reeds is aangehaald, staat robuustheid voor voldoende sterkte bij zowel bekende als onbekende buitengewone belastingen. Het beschouwen van belastingen met een bekende oorzaak is verplicht, de belastingseffecten van een onbekende oorzaak mogen buiten beschouwing gelaten worden. In het artikel *Robuust Rotterdam* (Bezemer & Willemen, Robuust Rotterdam, 2015) benoemen [Bezemer](#) en [Willemen](#) dat robuustheid *juist* gaat om belastingen met een *onbekende* oorzaak. Hoe wordt er in de praktijk omgegaan met robuustheid?

4.3.1 Menselijke fout als onbekende oorzaak

In het artikel *Robuust Rotterdam* (Bezemer & Willemen, Robuust Rotterdam, 2015) wordt de menselijke fout als voorbeeld van een buitengewone belasting met een onbekende oorzaak benoemd. Uit onderzoek is gebleken dat 80% tot 90% van de schadegevallen van bouwwerken wordt veroorzaakt door menselijke fouten (Terwel, 2015). Mede door dit aanzienlijke percentage noemen experts het merkwaardig dat de beschouwing van de onbekende oorzaak door het Bouwbesluit niet verplicht gesteld is en hiervoor geen eenduidige eisen geformuleerd worden door de Eurocode.

Het beoordelen van de menselijke fout heeft voor het eerst plaats gekregen in NEN-EN 1990. Vóór de aanwijzing van deze Eurocode in het Bouwbesluit 2012, is dit aspect in de Nederlandse normen niet direct beschouwd. In de Eurocode staat het volgende beschreven:

NEN 1990, 2.1: *“Een constructie dient zodanig ontworpen en uitgevoerd te zijn, dat zij niet disproportioneel zal worden beschadigd bij voorvallen als ontploffingen, schokbelastingen en de gevolgen van menselijke fouten.”*

Een constructie moet dus voorzien zijn van voldoende robuustheid om bescherming te bieden tegen de gevolgen van menselijke fouten. De term *voldoende robuustheid* levert volgens de experts veel vragen op. Enerzijds missen ze eenduidige eisen over wanneer een constructie over voldoende robuustheid bezit en anderzijds wordt het gebrek aan effectieve methoden om een constructie voldoende robuust te maken genoemd.

4.3.2 Beoordeling robuustheid

Volgens het merendeel van de ondervraagden is het lastig om waterdichte eisen op te stellen om de robuustheid van een gebouw te beoordelen. Diverse bronnen noemen het zelfs bijna onmogelijk. [Vrouwenvelder](#), expert op het gebied van probabilistisch rekenen⁶, vraagt zich ook af of prestatie-eisen objectief en algemeen geldend uitgewerkt kunnen worden. Zo zegt hij in een interview: “De aard van een onvoorziene belasting en de kans erop zijn per definitie moeilijk te kwantificeren. Een kans of kansverdeling is met de nodige mitsen en maren in te schatten door wereldwijd te kijken naar de analyses van instortingen. Er is hier echter nog een moeizame weg te gaan en subjectiviteit zal de discussie nog lang domineren.”

De heer [Van Herwijnen](#) heeft wel al een begin gemaakt aan het analyseren van instortingen. Hij geeft in het boek *Leren van instortingen* antwoord op de vraag ‘Waarom storten bruggen en gebouwen soms in?’ en bespreekt per situatie welke belangrijke lessen je hieruit kunt trekken.

⁶ De term ‘probabilistisch’ is gebaseerd op het probabilisme. Het probabilisme is de leer die rekening houdt met het feit dat het onmogelijk is om de absolute waarheid te kennen. Om zo dicht mogelijk bij de ‘waarheid’ te komen, wordt er gezocht naar hoe waarschijnlijk een risico voor kan komen. (Probabilisme, sd)

Risicoanalyse in plaats van prestatie-eisen

Vanwege de scepsis van nagenoeg alle ondervraagden over eenduidige prestatie-eisen voor de beoordeling van robuustheid, reikt een groot deel de optie aan om de robuustheid van een constructie middels een *risicoanalyse* te beoordelen. Hierin kan worden aangetoond dat er een bepaald niveau van robuustheid in de constructie aanwezig is. Over de invulling van de risicoanalyse bestaat er onder de geïnterviewde experts een grote diversiteit aan visies. De ondervraagde experts die ervaring hebben met opstellen en beoordelen van risicoanalyses, onder andere [Willemen](#) en [Walraven](#), vermelden wel dat ze geen gebruik maken van *Bijlage B – Informatie voor risicobeoordeling* uit NEN 1991-1-7. In deze bijlage staan richtlijnen voor de planning en uitvoering van een risicoanalyse. Ook [Braam](#) denkt dat een constructeur weinig kan met Bijlage B: “Dat is specialistenwerk.” De experts maken naar eigen zeggen gebruik van hun gezond verstand.

Risicomatrix

In 2002 werd Stufib-studiecel⁷ 2 opgericht met de opdracht zich te verdiepen in de problematiek ten aanzien van de robuustheid van bouwconstructies. In september 2006 verscheen het resultaat in Stufib-rapport 8: “Constructieve samenhang van bouwconstructies” (Wijte, et al., 2006).

Eén van de verdiensten van dit rapport was het inzichtelijk en hanteerbaar maken van een risicoanalyse.

De studiecel beschrijft dat een risicoanalyse moet bestaan uit de beschrijving van het object waarbij de aard van het bouwwerk, de activiteiten en de aantallen mensen die daarbij verwacht worden in te schatten. Aan de hand van deze bevindingen kan volgens de studiecel onder andere de rol in de samenleving en de waarschijnlijkheid op aanslagen bepaald worden. Vervolgens dient er een lijst van risicoscenario's⁸ opgesteld te worden waarbij betekenis moet worden geven aan de grootte van de kans en het gevolg van het risicoscenario. Hoe groter het gevolg en de kans, hoe strenger de te nemen maatregelen. Bovenstaande bevindingen zouden in de vorm van een risicomatrix vertaald kunnen worden, zie onderstaande tabel, afkomstig uit Stufib-rapport 8.

Tabel 3: Risicomatrix gebaseerd op risicoscenario's

Gevolg	Ernstig				X
	Hoog			X	
	Midden		X		
	Laag		X		
	Zeer laag	X			
		Zeer laag	Laag	Midden	Hoog
Kans					

Checklist

Volgens [Walraven](#) zou de risicoanalyse inhoudelijk een *checklist* moeten bevatten: “Er zou een checklist kunnen komen waarbij risico's in kaart worden gebracht. Op deze manier kan gecontroleerd worden of een constructie voldoende robuustheid bezit en geen belangrijke kritische elementen over het hoofd gezien zijn. In de Eurocode zou hier een hoofdstuk aan gewijd kunnen worden, waarin bijvoorbeeld per checkpunt oplossingen worden voorgeschreven.” [Walraven](#) geeft aan dat de constructieve veiligheid op deze manier op een kwalitatieve manier beschouwd kan worden. “Kwantitatief moet er op probabilistische wijze naar de veiligheid gekeken worden.” Echter, in een interview *Het gelijk van probabilistiek - Interview Ton Vrouwenvelder* (Linssen & Vrouwenvelder, 2015) vertelt [Vrouwenvelder](#): “Het lijkt mij zinloos als alle constructeurs zich probabilistiek eigen gaan maken.” Wel benoemt hij in hetzelfde artikel zijn wens dat de grotere ingenieursbureaus die expertise in huis hebben, al gaat het hierbij om een enkeling aan specialisten.

⁷ Een stufib-studiecel is een groep experts die actueel onderwerp ten behoeve van betonconstructies onderzoekt. De resultaten worden vastgelegd in Stufib-rapporten.

⁸ Volgens het rapport bestaan risicoscenario's uit: een oorzaak (bedreiging), een mechanisme (de fysieke opeenvolging van gebeurtenissen) en de gevolgen (doden, gewonden, kosten, milieuaantasting en dergelijke)

4.3.3 Eisen praktische toepassing robuustheid

Uit het literatuuronderzoek komt naar voren dat de Eurocode verschillende methoden aanreikt om een om disproporzionele instorting bij onvoorziene omstandigheden te voorkomen. Echter, de effectiviteit van deze methoden wordt door nagenoeg alle experts in twijfel getrokken.

In het artikel *Eisen aan robuustheid* (Wijte S., 2015) benoemt [Wijte](#) dat de verschillende toepassingen om een constructie robuust te maken, leiden tot verschillende prestaties van de constructie. Hij benoemt daarbij dat de omvang van de schade hierdoor per gebouw gigantisch kan verschillen. Welke schade hierbij als disproporzioneel beschouwd dient te worden, wordt volgens de experts in de Eurocode niet eenduidig toegelicht.

Grenswaarden voor disproporzionele schade

Zoals §3.2 *Disproporzionele schade* reeds aanhaalt, reikt de norm geen grenswaarden aan voor wanneer een schade in verhouding is met de aanvankelijke oorzaak. De experts benoemen wederom de kundigheid van de constructeur die dient te beoordelen wat disproporzioneel is. Daar voegen ze aan toe dat disproporționaliteit per situatie beoordeeld moet worden. [Wijte](#) noemt de Bijlmerramp als voorbeeld: “Er crasht een vliegtuig in een flatgebouw en het flatgebouw stort in. Nagenoeg iedereen vindt dat de schade die dit ongeval veroorzaakt heeft, in proportie is met de oorzaak.”

Volgens [Wijte](#) is er geen duidelijke graadmeter voor wat disproporzioneel is. [Galjaard](#) beaamt dit. Toch stelt hij namens ingenieursbureau ABT voor om hier grenzen aan te stellen. Zo reikt hij het voorbeeld aan om bij de beschouwing van robuustheid niet te kijken naar de kans en het gevolg van het risicoscenario, zoals benoemd in voorgaande paragraaf, maar naar het incasseringsvermogen van een constructief element en het percentage van het bouwwerk dat bezwijkt bij het wegvallen van dat element. Deze methode wordt nader toegelicht in §5.2 *Toetsen van robuustheid*.

Tweede draagweg versus key-elements

Een veelbesproken methode om een disproporzionele instorting van de constructie te voorkomen is de toepassing van een tweede draagweg. [Braam](#) verkiest deze beschouwing boven de toepassing van key-elements. De tweede draagweg methode krijgt van hem de voorkeur vanwege de bewustwording van de kritische punten in een ontwerp. Toch zegt hij: “Een constructeur zal eerder fan zijn van key-elements. Het toepassen van een grotere belasting op een constructie wordt vaak als een makkelijke oplossing ervaren; het is de vertrouwde berekening, maar dan met wat grotere krachten.” Hier voegt hij aan toe: “Het uitnemen van elementen en dan kijken of er een tweede draagweg is, is een heel ander verhaal, want dan moet er geschetst en nagedacht worden.”

Ook [Bezemer](#) en [Willemen](#) verkiezen een tweede draagweg boven de overige oplossingen die de Eurocode aanreikt: “De overige oplossingen zouden in combinatie met elkaar toegepast kunnen worden, het gaat namelijk om de samenhang en het incasseringsvermogen van de constructie in zijn geheel. De oplossing van de tweede draagweg bevat deze eigenschappen al afzonderlijk.” Hier voegt [Willemen](#) aan toe: “Een key-element wordt afzonderlijk getoetst; na deze toetsing blijft het een losstaand element en de zwakste schakel van het geheel. De samenhang wordt juist bewerkstelligd door de toepassing van trekbanden die elementen met elkaar koppelt. Dit is een voorbeeld van het combinerend toepassen van de andere mogelijkheden, in plaats van het toepassen van een tweede draagweg.” Het kijken naar robuustheid is volgens hen veel meer dan een tweede draagwegbeschouwing. De nadruk ligt op het kritisch kijken naar hetgeen dat men ontwerpt en uitvoert, gedurende het gehele bouwproces.

Tweede draagweg versus risicoanalyse

Door verschillende bronnen worden het toepassen van de tweede draagweg en het uitvoeren van een risicoanalyse gezien als twee aannemelijke methoden om de constructieve veiligheid van bouwwerken te waarborgen. Stufib Studiecel “Constructieve Samenhang van Bouwconstructies” heeft in haar eindrapport (Wijte, et al., 2006) de voor- en nadelen van de twee methoden op een rijtje gezet:

Tabel 4: Voor- en nadelen risicoanalyse en tweede draagweg (Wijte, et al., 2006)

Risicoanalyse	
Voordelen: - Identificeert gevaren en bezwijkmechanismen - Geeft beeld van risico's en verhoogt bewustzijn - Legt gevoelige punten in het ontwerp bloot - Werkt 'op maat'	Nadelen: - Tijd paradox⁹ - Hoog abstractieniveau - Arbeidsintensief - Hoge eisen aan communicatie en samenwerking tussen de betrokken partijen
Tweede draagweg	
Voordelen: - Beter werkbaar en implementeerbaar - Minder hoge eisen aan communicatie en samenwerking tussen betrokken partijen	Nadelen: - Grof en ongenueanceerd - Mogelijke disproportionele aanpassingen

Diverse bronnen geven aan dat het uitvoeren van een risicoanalyse een betere benadering van het probleem is dan het toepassen van een tweede draagweg. Deze mening wordt bekrachtigd met de veronderstelling dat deze methode disproportionele aanpassingen aan het ontwerp oplevert. Volgens hen staan deze aanpassingen niet in verhouding met de kans dat de buitengewone belasting optreedt. Andere bronnen hebben *wel* een voorkeur voor het creëren van een alternatieve draagweg. Bij de argumentatie ten aanzien van deze optie wordt geduid op het eenduidige karakter van de toepassing: de discussie van het wel of niet correct waarderen van de kans en het gevolg van de buitengewone belasting, wordt hiermee vermeden. De subjectiviteit speelt nauwelijks meer een rol.

Robuuste processen

Zoals in Tabel 4: Voor- en nadelen risicoanalyse en tweede draagweg naar voren komt, is de communicatie en samenwerking tussen betrokken partijen van essentieel belang om de robuustheid van een bouwwerk te waarborgen.

Tijdens een rondetafelgesprek over de verantwoordelijkheid op de bouw (Cement, 2016), werd onder meer aangehaald dat de aan het Bouwbesluit gerelateerde normen geen betrekking hebben op het proces, maar slechts op het eindresultaat van een bouwwerk. Daar waar de constructie tegen onvoorziene omstandigheden beschermd dient te worden, noemt [Terwel](#) de robuustheid van *het proces* minstens zo belangrijk. Tijdens het gehele traject bemoeien zich diverse partijen met het ontwerp en de uitvoering. [Willemen](#) benadrukt dat het overdragen van de ontwerpfilosofie van de ontwerper tussen deze partijen essentieel is voor het behouden van de robuustheid.

Controles

Nagenoeg alle experts benoemen ten aanzien van robuuste processen de essentie van controles in alle fasen van het project. Wanneer er tijdens het gehele traject voldoende controles worden uitgevoerd, kan men het maken van (menselijke) fouten zo veel mogelijk uitsluiten.

[Walraven](#) benoemt hierbij de branchevereniging TIS (Technische Inspectie Service) als mogelijke oplossing: zij verzorgen de robuustheid van zowel het bouwwerk als het proces. Hier voegt hij aan toe: “Natuurlijk kan (en wil) niet iedere constructeur elk project door de TIS laten controleren. Dit gebeurt slechts bij grote, risicovolle projecten. Voor de beoordeling van robuustheid zou er in de Eurocode een eenvoudige manier geformuleerd moeten worden.”

⁹ Beïnvloedingsfactoren zijn pas aan het einde van het ontwerp allemaal bekend, terwijl men het resultaat van de risicoanalyse aan het begin van de ontwerpfase nodig heeft op principiële ontwerpkeuzes te kunnen maken.

4.4 Verplichtstellen beschouwing onbekende oorzaak

Tijdens interviews is zowel aan gemeentelijke instanties als aan onafhankelijke experts de vraag gesteld of het Bouwbesluit de beschouwing van de onbekende oorzaak verplicht zou moeten stellen. Wat opvalt is dat nagenoeg alle onafhankelijke experts volmondig 'ja!' roepen. [Wijte](#) voegt hieraan toe dat hiervoor eerst een duidelijke eisen geformuleerd moet zijn in de Eurocode.

Modelcodes

Als reactie op het verzoek voor duidelijke eisen benoemt [Walraven](#) het proces van de Modelcodes. Hierin staan artikelen die net iets verder gaan dan de Eurocode. Deze artikelen hebben geen officiële status maar zijn opgesteld met het doel richting te geven aan de ontwikkeling van nieuwe internationale normen, net als de Eurocodes. [Walraven](#): "Met de Modelcodes zijn we al bezig met het verwerken van eisen voor robuustheid."

Onderstaande tabel is een greep uit de lijst van voorgestelde uitbreidingen van Modelcode 2020 met betrekking tot robuustheid. Deze lijst is vastgesteld op basis van de uitkomsten van verschillende vergaderingen van fib, Fédération internationale du béton. [Walraven](#) voegt hieraan toe, dat één van de eerste hoofdstukken van NEN-EN 1990, het kopje 'Conceptual design' moet krijgen. In dit hoofdstuk wordt beschreven dat de constructeur zich bewust moet worden van de mogelijkheden die er binnen het ontwerpen van een constructie zijn.

Tabel 5: Lijst van voorgestelde updates en uitbreidingen voor MC2020 betreft robuustheid (inclusief Nederlandse vertaling)

7.9 Verification of robustness 7.9.1. General 7.9.2 Specific methods to improve robustness by structural measures.	Revision needed - Introduction of redundancy as a design criterion – would it be possible to create some form of scoring system/metric to evaluate the robustness of the structural system? - Difference between assessment and design - Refer to collapse resistance concept - Analysis of risks/brittle or ductile behaviour → consequence of local failure.
7.9 Eisen aan robuustheid 7.9.1. Algemeen 7.9.2. Specifieke methoden om de robuustheid aan de hand van structurele maatregelen te verbeteren.	Herziening nodig - Introductie van redundantie als ontwerpcriterium - zou het mogelijk zijn om een vorm van scoresysteem/-matrix te creëren om de robuustheid van de constructie te beoordelen? - Verschil tussen beoordeling en ontwerp - Verwijzing naar het concept dat weestand biedt tegen instorting - Analyse van de risico's/bros of ductiel gedrag → gevolg van lokaal bezwijken

Concurrentieoverweging

[Walraven](#) is niet de enige expert die vindt dat er eenduidigere eisen aan robuustheid gesteld moeten worden. Ook [Wijte](#) erkent het probleem van het gebrek aan eenduidigheid op het gebied van regelgeving. Zo zegt hij: "Opdrachtgevers willen vaak geen geld besteden aan extra maatregelen die niet volgens de wet voorgeschreven zijn. Toch zouden de opdrachtgevers over voldoende kennis moeten beschikken om bij een nieuwe opdracht *wel* die robuustheid te eisen tegen onbekende buitengewone belastingen. Uit concurrentieoverwegingen zullen constructeurs geen robuustheid door onbekende oorzaken in hun ontwerp toepassen wanneer dit door de opdrachtgever niet geëist is." Hij voegt hieraan toe: "De overheid dient de publieke veiligheid te bewaken. Zij moeten ingrijpen en ervoor zorgen dat opdrachtgevers willen betalen voor het verplichtstellen van robuustheid door onbekende oorzaken zoals mensenfouten." Wanneer dit niet gebeurt, zullen de gemeentelijke instanties slechts belastingen conform het Bouwbesluit in rekening brengen. Zo vermeldt één van de instanties letterlijk: "Wij hanteren het Bouwbesluit. Dit geldt ook in het geval van buitengewone ontwerpsituaties, waarbij wij alleen toetsen op bekende oorzaken. Onbekende oorzaken worden namelijk niet genoemd in het bouwbesluit."

4.4.1 Verplichtstellen tweede draagweg

Wanneer de beschouwing van de buitengewone belasting door een onbekende oorzaak verplicht gesteld wordt, dienen er eenduidige prestatie-eisen opgesteld te worden om de belastingeffecten van deze onvoorziene oorzaken te kunnen weerstaan. Zoals in §4.3.3 *Eisen praktische toepassing robuustheid* wordt aangehaald, is de toepassing van een tweede draagweg volgens de experts een betrouwbare methode om disproportionele instorting te voorkomen.

Linken aan gevolklassen

Aan verschillende experts is de vraag gesteld of de toepassing van een tweede draagweg voor ieder bouwwerk in Nederland verplicht gesteld zou moeten worden. De heer [Walraven](#) beantwoordt deze vraag als volgt: “Ja, waarom niet? Ik zou ze, denk ik, ook linken aan de gevolklassen. Voor de hogere gevolklassen zou ik een tweede draagweg dan sowieso verplicht stellen. Voor een standaard eengezinswoning is het vaak niet nodig.” Hier voegt hij aan toe dat verschillende constructies stiekem al over enige reservecapaciteit beschikken. Hij noemt hierbij de toepassing van de trekband rondom een prefab vloer: “Deze toepassing kost bijna niks én maakt de constructie vele malen sterker!” Ook [Willemen](#) en [Bezemer](#) zijn voorstanders van het verplichtstellen van een tweede draagweg. Volgens hen verzorgt deze methode zowel de samenhang als het incasseringsvermogen van de constructie, twee eigenschappen die een constructie robuust maken.

Op de vraag of alle gemeentelijke instanties zich aan dezelfde toetsingscriteria zouden moeten houden wanneer het gaat om constructieve veiligheid reageert [Willemen](#) als volgt: “Absoluut! Echter, bij veel gemeenten ligt dit gevoelig. Met het eisen van robuustheid voelen wij ons als gemeente gesteund door de grote aanwezigheid van hoogbouw in de stad en de maatschappelijke gevolgen die hierbij komen kijken. Het probleem bij andere gemeenten is, dat ze onvoldoende ervaring hebben met robuustheid.”

4.4.2 Gemeente Rotterdam

Uit de verschillende interviews is naar voren gekomen dat gemeente Rotterdam ‘berucht’ is vanwege het toetsen van een tweede draagweg. Diverse artikelen vermelden dat het toetsen van een tweede draagweg *een specifieke eis* is van de gemeente. Uit het interview met [Bezemer](#) en [Willemen](#) blijkt echter dat het geen *eis* is, maar *een methode* voor het omgaan met de risico’s van kwetsbare onderdelen van een gebouw. Voldoende robuustheid wordt namelijk wel geëist.

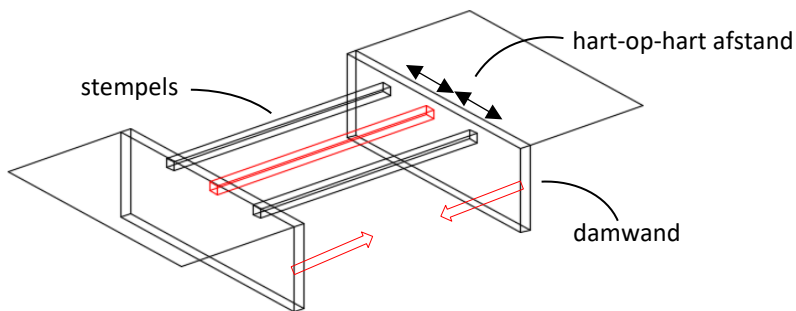
Zware constructies

De heer [Galjaard](#) noemt in het artikel *Discussie over robuustheidsconstructies duurt voort* (Velden, 2014) de tweede draagweg-methode van de gemeente Rotterdam consequent, maar benadrukt zijn veronderstelling dat de methode zware constructies oplevert. [Bezemer](#) ontkracht deze veronderstelling en vermeldt dat een tweede draagweg helemaal niet zo’n grote (financiële) impact op het ontwerp hoeft te hebben, waarbij hij aangeeft dat de meeste mensen dat wel denken. De gewenste robuustheid van constructies stuit bij veel ontwerpende constructeurs op weerstand.

De heer [De Roo](#), Directeur PPS en Grote Projecten STRABAG Belgium, kan dit als uitvoerende partij beamen. De Roo was tijdens de bouw van De Rotterdam – destijds (2013) Europa’s grootste gebouw in aanbouw – projectdirecteur namens Züblin, de bouwkundige aannemer van dit project. Hij vertelt tijdens een interview dat de vereiste tweede draagweg geen obstakel was. Zo zegt hij: “In een voortraject is de robuustheid reeds besproken en berekend door de adviserende constructeur. Wij moesten het alleen nog bouwen.”

Tijdelijke tweede draagweg bij bouw De Rotterdam

De tijdelijke constructie van de bouwput van De Rotterdam, is wel door Züblin berekend. De Roo licht toe: “We moesten bij de berekening van de bouwput rekening houden met het wegvallen van een stempel, hiervoor diende een tweede draagweg toegepast te worden. We hebben dit opgelost door de stempels met de dubbele hart-op-hart afstand te berekenen.” In *Figuur 17: Principe stempels bouwput* is dit principe geïllustreerd. In deze figuur is een fragment van een bouwput te zien, bestaande uit damwanden en stempels. Vanwege de aanwezige gronddruk willen de damwanden naar elkaar toe bewegen, wat is weergegeven met de rode pijlen. De stempels gaan deze beweging tegen en komen hierbij onder druk te staan. Wanneer één stempel bezwijkt, dienen de andere twee stempels deze extra krachten op te vangen. Hiermee wordt een alternatieve krachtsafracht, oftewel een tweede draagweg gecreëerd voor de bezwijken stempel.



Figuur 17: Principe stempels bouwput

Afwijkend gedrag

Wijte noemt de robuustheidseis van gemeente Rotterdam *afwijkend gedrag*: “Eigenlijk hebben ze geen recht om dit te eisen, maar door als opdrachtnemer hier tegenin te gaan, veroorzaak je vertraging in het bouwproces en tijd is geld.” Hier voegt hij aan toe: “Er is geen tijd voor discussie tijdens het bouwtraject, de discussie wordt verder gevoerd in rondetafelgesprekken waarbij er over sommige zaken nog steeds onenigheid bestaat.” Wijte vergelijkt de eis van gemeente Rotterdam met de ontwerpeisen voor vervormingen: “Voor doorbuiging worden ook ontwerpregels genoemd, terwijl deze eisen in de wet niet verplicht worden gesteld.”

4.5 Beantwoording deelvragen

1. Waar schieten de bouwvoorschriften tekort met betrekking tot robuustheid?

Volgens diverse experts schieten de bouwvoorschriften op meerdere vlakken tekort:

- De constructieve voorschriften uit het Bouwbesluit zijn slechts gericht op veiligheid, de bruikbaarheid wordt uit het oog verloren.
- De regelgeving uit de Eurocode schiet op sommige vlakken tekort qua effectiviteit; bepaalde voorschriften lijken slechts een truc om het risico op een eerdere gebeurtenis te tackelen.
- De aan het Bouwbesluit gerelateerde normen hebben slechts betrekking op het eindresultaat van een bouwwerk, maar niet op de robuustheid van het proces.
- Het Bouwbesluit stelt geen eisen aan de beschouwing van buitengewone belastingen met een onbekende oorzaak en daarmee ook niet aan de beschouwing van de menselijke fout. Opdrachtgevers willen geen extra geld besteden aan maatregelen die niet volgens de wet voorgeschreven zijn.

2. Waar schieten constructeurs tekort met betrekking tot robuustheid?

Ondanks de gezamenlijke opinie over enkele tekortkomingen van de bouwvoorschriften, worden er door zowel ontwerpende als toetsende constructeurs al jaren naar eigen inzicht keuzes gemaakt op het gebied van robuustheid. Volgens de experts gaat bij deze constructeurs op de volgende punten mis:

- Constructeurs gaan vaak slechts uit van de minimumeisen.
- Robuustheid gaat over samenhang, constructeurs beseffen niet altijd dat het afzonderlijk toetsen van constructie-elementen weinig toevoegt aan robuustheid.

3. Hoe kan een gebouw op robuustheid beoordeeld worden?

Er worden door de experts verschillende oplossingen geboden om de robuustheid van een constructie te beoordelen, hoofdzakelijk gaat het om het opstellen van een risicoanalyse die op verschillende manieren vormgegeven kan worden, namelijk als:

- een risicomatrix;
- een checklist.

4. Hoe kan een constructie van voldoende robuustheid worden voorzien?

In eerste instantie dient zowel de formulering *disproportionele instorting* als de formulering *voldoende robuustheid* gedefinieerd en begrensd te worden.

Vervolgens draagt het merendeel van de experts de tweede draagwegmethode aan als oplossing om een constructie bij onvoorziene omstandigheden robuust te ontwerpen.

5. Wat zijn de moeilijkheden van gevolgsclassificatie?

De definitie van de gevolgklassen (zeer grote, aanzienlijke gevolgen en geringe gevolgen) is sterk intuïtief. De classificatie op basis van deze definities behoeft het oordeel van de deskundige. Voorbeelden van toepassingen geven hierin een oplossing, maar de formulering van deze voorbeelden zijn niet waterdicht.

Tóch blijkt uit het praktijkonderzoek dat er over het algemeen geen moeilijkheid ervaren worden met de gevolgsclassificatie: “Een constructeur is niet geïnteresseerd in alles wat er aan bespiegelingen achter de klassen zit. De constructeur moet een constructie dimensioneren en wil weten welke belastingen en belastingfactoren van toepassing zijn en is niet bezig met subjectieve termen.”

5 KWALITATIEVE BESCHOUWING

De kwalitatieve beschouwing vormt het vervolg van het literatuur- en praktijkonderzoek. In het voorgaande hoofdstuk is beschreven wat volgens de experts de moeilijkheden van de robuustheid zijn. Deze bevindingen vormen de basis voor de kwalitatieve beschouwing van dit afstudeeronderzoek, waarbij een eigen opvatting over *robuustheid* gegeven wordt. Deze beschouwing zal dienen als ‘brugfunctie naar een oplossing’.

In de kwalitatieve beschouwing wordt gezocht naar antwoord op de volgende deelvragen:

1. Hoe kan de discrepantie tussen het Bouwbesluit en de Eurocode betreft de beschouwing van de onbekende buitengewone belasting geëlimineerd worden?
2. Wat is de beste methode om een constructie op robuustheid te beoordelen?
3. Wat is de beste methode om een constructie van voldoende robuustheid te voorzien?

5.1 Eenduidige regelgeving

Zoals uit het praktijkonderzoek blijkt, heerst er nog veel onduidelijkheid op het gebied van robuust bouwen. Dat onderzoek laat zien dat zowel het Bouwbesluit als de Eurocode op dit moment tekort schieten in de regelgeving over het beschouwen van buitengewone belastingen, waarvan de oorzaak onbekend is. Vanwege het feit dat iedere constructeur de norm anders kan interpreteren, bestaat er een kans dat niet ieder project dezelfde mate van constructieve veiligheid bezit. Het is daarbij onverantwoord dat de gebruikers van gelijksoortige gebouwen in de ene gemeente meer risico lopen dan in andere gemeenten. Hier moet verandering in komen.

5.1.1 Oplossing

Om de discrepantie tussen het Bouwbesluit en de Eurocode met betrekking tot buitengewone belastingen te elimineren, dient één van de twee normen aangepast te worden:

- In de NEN-EN 1991-1-7 dient de beschouwing van de onbekende belasting, zoals vermeld in §3.3 *Buitengewone ontwerpsituaties – strategieën voor beperking van de mate van lokaal bezwijken*, weggehaald te worden;
- Het Bouwbesluit 2012 dient in de tekst te verwijzen naar de betreffende normteksten van de Eurocode en hiermee de beschouwing van de onbekende belasting verplicht te stellen.

Uit het praktijkonderzoek blijkt dat 80 tot 90% van de schadegevallen veroorzaakt wordt door een menselijke fout, ook wel een buitengewone belasting met onbekende oorzaak. Dit aanzienlijke percentage benadrukt de behoefte aan een eenduidige regelgeving betreft de beschouwing van de onbekende buitengewone belasting. Om deze reden wordt het schrappen van de beschouwing uit de Eurocode niet als optie gezien.

Wanneer het Bouwbesluit 2012 het betreffende normdeel van de Eurocode aanwijst, is de beschouwing van de onbekende belasting verplicht. Een schaduwzijde van deze maatregel is dat de constructeur vrij is in de te hanteren methode waardoor en nog steeds een grote diversiteit heerst in de constructieve veiligheid van bouwwerken. Dit kan worden opgelost door aan Bijlage A van NEN-EN 1991-1-7: *Ontwerp voor de gevolgen van lokaal bezwijken van gebouwen door een onbekende oorzaak* te herzien en een normatieve status te geven.

5.2 Toetsen van robuustheid

Uit het praktijkonderzoek komt naar voren dat er een dringende behoefte is naar eenduidige eisen betreft de robuustheid van gebouwen bij onvoorziene oorzaken. De scepsis van de experts voor eenduidige eisen ten aanzien van robuustheid zijn dermate overheersend dat men niet ontkomt aan een oplossing die overeenkomt met het uitvoeren van een risicoanalyse.

Het voorstel uit Stufib-rapport 8 “Constructieve samenhang van bouwconstructies”, zoals aangehaald in §4.3.2 *Beoordeling robuustheid*, omvat belangrijke aspecten die de basis vormen van de beschouwing van de robuustheid van de constructie. Bij robuustheid is het van groot belang om een schatting te maken van zowel de economische als de sociale schade als gevolg van een bepaald risico. Deze schatting is gebaseerd op enkele risicoscenario's, welke bestaan uit:

- een oorzaak (bedreiging);
- een mechanisme (de fysieke opeenvolging van gebeurtenissen) en
- de gevolgen (bijvoorbeeld doden, gewonden, kosten en milieuaantasting).

Per risicoscenario moet de constructeur oordelen over hoe groot de kans is dat het risico optreedt en welke gevolgen het risico met zich meebrengt. Een manier om deze beoordeling weer te geven is in de vorm van een risicomatrix.

Bovenstaand voorstel van Stufib-rapport 8 bevat, zoals gezegd, belangrijke aspecten die ten aanzien van robuustheid zeker meegenomen dienen te worden. Echter, de invulling van deze analyse blijft subjectief. Het voorstel van ABT daarentegen (zie §4.3.3 *Eisen praktische toepassing robuustheid*) rekent enigszins af met deze subjectiviteit door in plaats van de kans en het gevolg, het incasseringsvermogen en het schadepercentage te beschouwen. Dit zijn twee termen waaraan duidelijke grenzen gesteld kunnen worden. Bovendien is deze beschouwing niet gebaseerd op risicoscenario's, die eveneens intuïtief bepaald worden, maar op afzonderlijke constructie-elementen.

5.2.1 Beoordelen constructie-elementen

Het voorstel van ABT om de robuustheid middels begrensde gevolgen en begrensde incasseringsvermogen te beschouwen, is een methode waarbij minder verdeeldheid onder de deskundigen zal ontstaan. Bij deze methode worden afzonderlijke constructie-elementen beoordeeld. Elke vloer, balk en ligger worden genummerd en worden vervolgens in onderstaande matrix geplaatst.

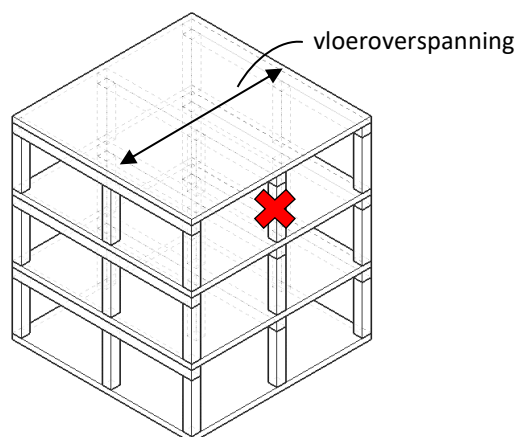
De opzet van deze matrix is afkomstig van Ir. J. Galjaard, de invulling is echter zelf uitgevoerd.

Tabel 6: Risicomatrix (ingevuld voorbeeld)

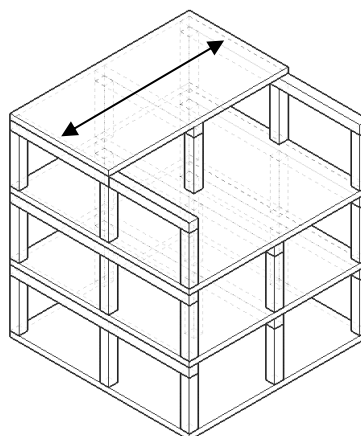
Gevolg Percentage lokaal bezwijken	Zeer groot > 15%	9	8,35,36	24, 34	38, 39	3, 16
	Groot 10 – 15%	23	7	26, 37	40	6
	Middel 5 – 10%	21, 25	2,5,29,30	5,15,23, 33	31,3 2	3,13,18
	Klein 0 – 5%	1,12,22	17,19,20	4,11,14	10	41, 42
		Zeer groot	Groot	Midden	Klein	Zeer klein
Incasseringsvermogen Gebaseerd op bouw-/bevestigingsmethode						

Gevolg

In bovenstaande tabel wordt het *gevolg* begrensd door verschillende percentages van lokaal bezwijken. Dit percentage is gebaseerd op het gedeelte van het bouwwerk dat bezwijkt wanneer het beschouwde element wegvalt. De beoordeling kan rekenkundig beschouwd worden. Bij een gelijk verdeelde beukmaat (doorgaans de afstand tussen 2 verticale dragende elementen) zou gelijkwaardigheid voor bepaalde elementen kunnen voldoen.



Figuur 18: Constructie in normale toestand



Figuur 19: Constructie na het bezwijken van een kolom

Bovenstaande figuren geven een voorbeeld van de beschouwing van het percentage van lokaal bezwijken. In *Figuur 18: Constructie in normale toestand* is een constructie te zien die is opgebouwd uit kolommen, balken en vloeren. Met zwarte pijl is de overspanningsrichting van de vloer aangegeven en het rode kruis geeft de kolom aan die in dit voorbeeld fictief verwijderd wordt.

In *Figuur 19: Constructie na het bezwijken van een kolom* is de constructie te zien die deels bezweken is door het wegvallen van de kolom. Bij het wegvallen van de kolom verliest de balk zijn steunpunt. Vervolgens verliest de bovenliggende vloer zijn steunpunt bij het wegvallen van de balk.

Stel, de vloeren hebben een lengte- en breedtemaat van 10 meter. De totale vloeroppervlakte van de gehele constructie is dan 400 vierkante meter. Bij het wegvallen van de kolom valt de helft van het bovenste vloerveld weg, dit is 50 vierkante meter. Met een snel rekensommetje is de oppervlakte van het bezweken vloerveld 12,5% van de vloeroppervlakte van de gehele constructie. Wanneer er slechts naar het bezwijken van vloeren gekeken wordt, zou het gevolg van het bezwijken van deze kolom volgens de risicomatrix groot (10-15%) zijn.

Incasseringsvermogen

Het incasseringsvermogen van een element is gebaseerd op de bouwwijze van het constructieonderdeel. Prefab betonconstructies scoren over het algemeen laag; de stabiliteit en samenhang van deze constructie is vergelijkbaar met een kaartenhuis. Wanneer dezelfde constructie in het werk gestort is, is het incasseringsvermogen van deze elementen vanwege de aanwezigheid van de natte knopen¹⁰ vele malen groter. De gradaties *zeer groot* tot en met *zeer klein* kunnen verbonden worden aan de zowel de bouwmethode als het materiaal. Zie onderstaande tabel voor enkele voorbeelden.

Tabel 7: Voorbeelden incasseringsvermogen van bouwmethoden

Incasseringsvermogen	Voorbeelden bouwmethoden
Zeergroot	In het werk gestort beton; staalconstructie met momentvaste verbindingen
Groot	Prefab beton met natte knopen
Midden	Staalconstructies
Klein	Prefab beton met droge knopen;
Zeerklein	Traditionele houtconstructies; traditionele steenconstructies

¹⁰ Op de bouwplaats in het werk gestorte verbindingen tussen twee betonnen onderdelen.

Maatregelen

Wanneer het constructie-element een plaats heeft gekregen in de risicomatrix, zie *Tabel 6: Risicomatrix (ingevuld voorbeeld)*, dienen er maatregelen genomen te worden om het element dermate te beschermen dat de kans op disproportionele instorting gereduceerd wordt. Hierbij wordt er dus niet alleen naar het element zelf gekeken, maar wordt de samenhang van de constructie ook beschouwd. De kleuren rood, oranje, geel, groen en wit uit de risicomatrix geven de mate van de te nemen maatregelen aan. De maatregelen verschillen per gevolgklasse. *Tabel 8: Maatregelen behorend bij risicomatrix* geeft een voorbeeld van de te nemen maatregelen per gevolgklasse weer.

Tabel 8: Maatregelen behorend bij risicomatrix

Gevolgklasse	Maatregelen rood	Maatregelen oranje	Maatregelen geel	Maatregelen groen	Maatregelen wit
CC3	Kwalitatieve + kwantitatieve risicoanalyse Tweede draagweg	Kwalitatieve risicoanalyse Tweede draagweg	Kwalitatieve risicoanalyse	Kwalitatieve risicoanalyse	Niets
CC2b	Kwalitatieve + kwantitatieve risicoanalyse Tweede draagweg	Kwalitatieve risicoanalyse	Kwalitatieve risicoanalyse	Niets	Niets
CC2a	Kwalitatieve risicoanalyse Tweede draagweg	Kwalitatieve risicoanalyse	Niets	Niets	Niets
CC1	Kwalitatieve risicoanalyse	Kwalitatieve risicoanalyse	Niets	Niets	Niets

Kwalitatieve en kwantitatieve risicoanalyse

In bovenstaande tabel worden zowel kwalitatieve als kwantitatieve risicoanalyses als mogelijke maatregelen genoemd. In een risicoanalyse worden de gevolgen van bezwijken en de kansen op mogelijke risicoscenario's bepaald. Bij de kwalitatieve (beschrijvende) analyse dienen de kansen en de gevolgen slechts tekstueel beschouwd te worden. Bij de kwantitatieve (rekenkundige) analyse wordt deze bepaling gedaan aan de hand van probabilistische berekeningsmethoden.

Zowel bekende als onbekende exceptionele belastingen worden bij beide analyses beschouwd. De maatregelen die uit de analyses volgen kunnen zowel constructief als niet-constructief zijn. Voorbeelden van constructieve ingrepen zijn het versterken van elementen en het toepassen van een tweede draagweg. Een voorbeeld van een niet-constructieve maatregel is het toepassen van extra veiligheids- en onderhoudscontroles.

5.3 Toepassing robuustheid

Het is vanzelfsprekend dat het onmogelijk is om ieder bouwwerk te beschermen tegen alle mogelijke onvoorziene gebeurtenissen (de naam zegt het al). Daarom is het voor zowel de Eurocode als voor het Bouwbesluit niet gemakkelijk om hiervoor eenduidige prestatie-eisen op te stellen. Toch blijkt uit het praktijkonderzoek dat er een dringende behoefte is aan een eenduidige methode om een constructie van voldoende robuustheid te voorzien.

5.3.1 Disproportioneel

Voorafgaand aan het formuleren van eenduidige methoden om de kans op een disproportionele instorting van de constructie te reduceren, dient de norm de term *disproportioneel* te begrenzen. De grens voor een aanvaardbare lokale beschadiging (100 m² of 15 % van de vloeroppervlakte van twee aangrenzende vloervelden) die momenteel nog indicatief is, moet herzien worden en dient vervolgens een normatieve status te krijgen. Omdat het veiligheidsniveau binnen Europa niet overal gelijk is, zou het een voorstel kunnen zijn om de grens voor disproportionaliteit in de nationale bijlage te verwerken. Het vaststellen van deze grens is een studie op zich en valt buiten de reikwijdte van dit onderzoek.

5.3.2 Methoden

Uit het literatuuronderzoek komt naar voren dat er verschillende methoden zijn om een constructie van voldoende robuustheid bij onbekende oorzaken te voorzien. Uit het praktijkonderzoek komt naar voren dat de effectiviteit van de methoden, bijvoorbeeld de key-elements, in twijfel genomen wordt.

Tweede draagweg

In Stufib-rapport 8 worden risicoanalyses en het toepassen van de tweede draagweg als methoden met elkaar vergeleken. Er kan gesteld worden dat de risicoanalyse een middel om de robuustheid van het gebouw te *beoordelen*. De tweede draagweg is een methode om de robuustheid in de praktijk *toe te passen*.

De methode van de toepassing van de tweede draagweg is volgens verschillende deskundigen de beste optie. Het lijkt de meest betrouwbare methode om een constructie bij onvoorziene belastingen van voldoende incasseringsvermogen te voorzien. Het fictief verwijderen van de kolommen komt namelijk het best overeen met de werkelijke situatie bij onvoorziene omstandigheden. Ook is de toepassing controleerbaar en vrijwel geheel objectief.

Key-elements

In sommige gevallen (bijvoorbeeld bij het wegvallen van een hoekkolom) kan het voorkomen dat een alternatieve krachtsafdracht voor een element niet mogelijk is. In dit geval wordt er in de praktijk vaak uitgeweken naar het toepassen van de zogenaamde key-elements. Uit het praktijkonderzoek is gebleken dat deze toepassing weinig toevoegt aan de robuustheid. Deze methode dient dus herzien te worden aangezien een passend alternatief voor de alternatieve krachtsafdracht gewenst is.

Aanvaardbaar niveau van lokaal bezwijken

Een andere optie is het terugvallen op het aanvaardbare niveau van lokaal bezwijken. Wanneer een hoekkolom van een bouwwerk bezwijkt, zou de bovenliggende balk inclusief vloer ook mogen bezwijken mits het bezwijken vloeroppervlakte binnen een vastgesteld percentage valt.

In *H6 Kwantitatieve beschouwing* is er een zestal situaties beschouwd waarbij een kolom wegvalt uit een stalen raamwerk. Met de hierboven genoemde methoden wordt bekeken hoe het raamwerk binnen hetzelfde stramien voor de beschouwde situaties voldoende robuustheid bevat.

5.4 Beantwoording deelvragen

1. Hoe kan de discrepantie tussen het Bouwbesluit en de Eurocode betreft de beschouwing van buitengewone belastingen geëlimineerd worden?

- Het Bouwbesluit moet de beschouwing van de exceptionele belasting met onbekende oorzaak verplichtstellen.
- De bruikbare suggesties van bijlage A van NEN 1991-1-7 dienen herzien te worden en overeen te komen met de suggesties uit §3.3 *Buitengewone ontwerpsituaties – strategieën voor beperking van de mate van lokaal bezwijken* uit dezelfde Eurocode.
- De term *disproportioneel* dient begrensd te worden. Deze begrenzing dient geformuleerd te worden in de nationale bijlage.

2. Wat is de beste methode om een constructie op robuustheid te beoordelen?

Om de constructie op robuustheid te beoordelen dienen aanvankelijk de constructie-elementen afzonderlijk beoordeeld te worden. Hierbij wordt gekeken naar het incasseringsvermogen van het element en naar het gevolg na het bezwijken van het element. Voor de te nemen maatregelen wordt de uitkomst van incasseringsvermogen en het gevolg gecombineerd met de verschillende gevolgklassen. Aan de hand van deze combinatie volgen maatregelen die het element afzonderlijk moeten voorzien van voldoende robuustheid en die zorgen voor de samenhang met de rest van de constructie.

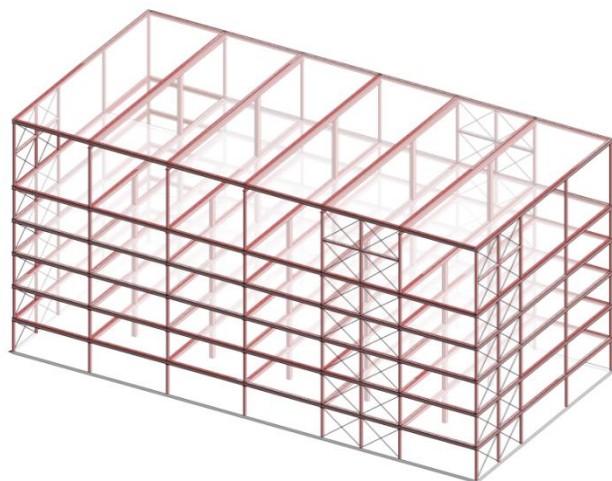
3. Wat is de beste methode om een constructie van voldoende robuustheid te voorzien?

Om een constructie van voldoende robuustheid te voorzien, dient er voor ieder kritiek element een tweede draagweg toegepast te worden. Welke elementen kritiek zijn volgt uit bovenstaande methode. De toepassing van de tweede draagweg heeft de voorkeur boven het uitvoeren van een risicoanalyse vanwege het controleerbare en relatief objectieve karakter.

6 KWANTITATIEVE BESCHOUWING

De kwantitatieve beschouwing dient ter onderbouwing en verduidelijking van het kwalitatief onderzoek. Uit de kwalitatieve beschouwing blijkt dat de toepassing van een tweede draagweg de meest wenselijke methode is om een constructie robuust te maken. Doorgaans wordt aangenomen dat de toepassing van een tweede draagweg veel impact heeft op de constructie. Echter, gemeente Rotterdam betwist dit. Volgens deze instantie hoeft een tweede draagweg helemaal niet zo'n grote (financiële) impact te hebben, zoals ze stellen in §4 *Praktijkonderzoek*. De tweede draagweg van betonconstructies is reeds veelvuldig onderzocht, zoals in (Dijk, 2011) en (De Boer, 2012), maar hoe is de alternatieve krachtsafdracht bij staalconstructies op te vangen?

Deze kwantitatieve beschouwing bevat rekenvoorbeelden van de toepassing van een tweede draagweg bij een stalen raamwerk, zie *Figuur 20: Basismodel in Revit*. Van dit 3D-model wordt één midden-stramien, ofwel één 2D-raamwerk onder de loep genomen. In dit representatief raamwerk wordt herhaaldelijk één kolom fictief verwijderd, waarbij onderzocht wordt hoe de constructie zich gedraagt en hoe de alternatieve krachtsafdracht binnen het stramien verwezenlijkt kan worden.



Figuur 20: Basismodel in Revit

In de §6.4 *Resultaat* wordt de impact van de kolomverwijdering op het raamwerk weergegeven. Deze impact wordt vertaald in percentages voor het extra benodigde staal, zodat iedereen (gemeentes, constructiebureaus en aannemers) een beter beeld krijgt van de extra kosten voor een tweede draagweg. Door gebruik te maken van twee identieke mechanicamodellen wordt de impact van zowel CC2- als CC3-constructies in beeld gebracht en kan een eerlijke vergelijking tussen de beide gevolklassen plaatsvinden.

Het uitgebreide rapport van de kwantitatieve beschouwing is te vinden in Bijlage C1 *Toetsing tweede draagweg*. In deze beschouwing wordt gezocht naar antwoord op de volgende deelvraag:

Welke invloed heeft het wegvallen van een dragend element op het gedrag van een (staal)constructie?

6.1 Uitgangspunten en aannames

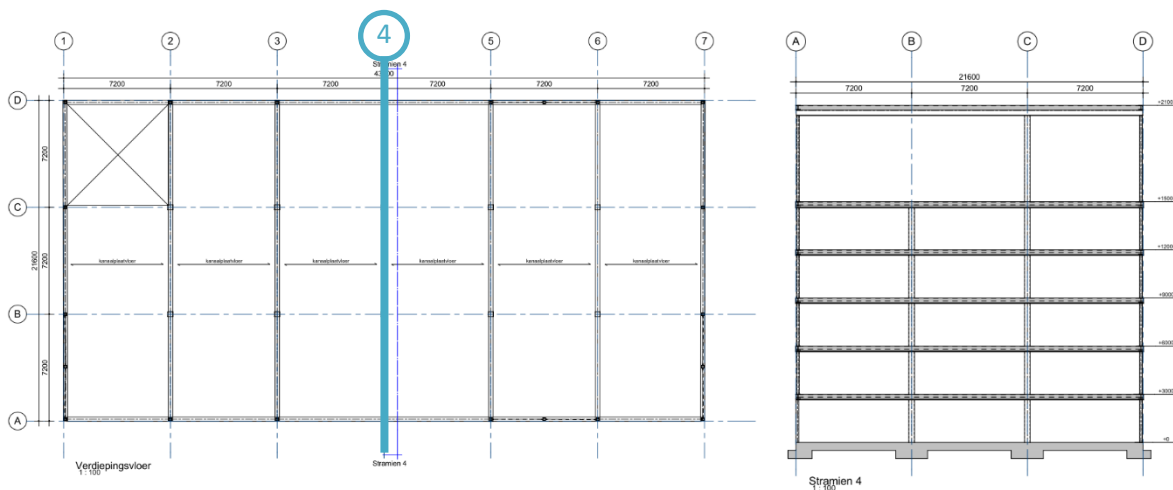
6.1.1 Het basismodel

Om de impact van een buitengewone ontwerpsituatie tussen de gevolklassen CC2 en CC3 weer te geven, is een basismodel (zie *Figuur 20: Basismodel in Revit*) opgesteld, dat voor beide gevolklassen te gebruiken is. Wanneer het basismodel is berekend volgens gevolgklasse CC2, wordt gesproken van basismodel 1. Het basismodel dat berekend is volgens gevolgklasse CC3, wordt basismodel 2 genoemd.

Het basismodel is een staalconstructie, waarvan de kolommen als kokerprofielen (K-profielen) en de liggers als HE-profielen zijn uitgevoerd. De stalen liggers zijn doorlopend en de kolommen worden hier per verdieping tussen bevestigd. Voor de vloeren wordt uitgegaan van betonnen kanaalplaten.

De afmetingen van het model, volgens *Figuur 21: Plattegrond en doorsnede stramien 4 van het basismodel in Revit*, zijn als volgt:

- Stramienmaat = 7,2 x 7,2 meter
- Stramienhoogte¹¹ = 3,0 meter
- Lengte basismodel = 43,2 meter (6 * 7,2)
- Breedte basismodel = 21,6 meter (3 * 7,2)
- Hoogte basismodel = 21,0 meter (5 verdiepingen * 3,0 + 1 verdieping * 6,0)



Figuur 21: Plattegrond en doorsnede stramien 4 van het basismodel in Revit

De twee modellen zijn qua constructieopzet hetzelfde. Het verschil tussen model 1 en model 2 komt voort uit het gebruik van de vloer op de vijfde verdieping.

- Basismodel 1 (CC2)
 - o Verdieping 0 t/m 4: kantoorfunctie
 - o Verdieping 5: bioscoop (met vaste zitplaatsen voor circa 200 personen)
- Basismodel 2 (CC3)
 - o Verdieping 0 t/m 4: kantoorfunctie
 - o Verdieping 5: zaal (voor meer dan 500 personen)

Het volledig doorrekenen van beide modellen is in het korte tijdsbestek van dit afstudeeronderzoek niet haalbaar. Om deze reden is de tweede draagweg voor één representatief raamwerk (stramien 4) beschouwd.

¹¹ De verdiepingshoogte is gelijk aan de stramienhoogte met uitzondering van de vijfde verdieping (2 * 3 = 6 m.)

6.1.2 Aanpak berekening

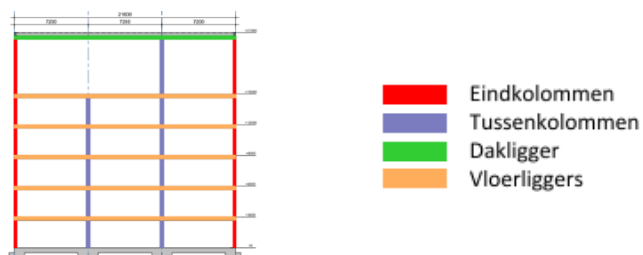
De berekeningen hebben betrekking op de capaciteit en de tweede draagweg van het raamwerk. Hierbij zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- De samenhang van het totale bouwwerk is niet meegenomen.
- De oplossing zijn slechts in het raamwerk van de beschouwde stramien gevonden. Een unity check¹² (u.c.) tussen 0,8 en 1,0.
- De stabiliteit blijft in geval bij calamiteiten gehandhaafd.
- De momentcapaciteit¹³ in de bouten is bij de tweede draagweg berekening meegenomen.

Om de berekening voor de kwantitatieve beschouwing te vereenvoudigen zijn de volgende factoren buiten beschouwing gelaten:

- meewerkend effect van de vloer op de staalconstructie;
- horizontale windbelasting;
- imperfecties;
- tweede orde effect;
- schaakbordcombinatie.

Figuur 22: Verklaring raamwerkprofielen weergeeft de benamingen van de liggers en kolommen, zoals genoemd bij de berekeningen.



Figuur 22: Verklaring raamwerkprofielen

Het raamwerk van basismodel 1 en 2 wordt in eerste instantie berekend volgens de blijvende “normale” ontwerpsituatie (§6.2 *Basismodel*). Vervolgens worden beide modellen onderworpen aan een fictieve onbekende buitengewone belasting, waardoor een kolom wegvalt, de zogenoemde buitengewone ontwerpsituatie (§6.3 *Calamiteitenmodel*). Hieruit volgen de calamiteitenmodellen.

Beide modellen zijn op dezelfde manier berekend. Om deze reden wordt slechts het proces van model 1 (CC2) in het hoofdrapport aangehaald. In §6.4 Resultaat worden de eindresultaten van zowel model 1 als 2 besproken en vergeleken. Voor alle berekeningen zie Bijlage C1 Toetsing tweede draagweg.

6.1.3 Hypotheses

Voorafgaand aan de kwantitatieve beschouwing zijn twee hypothesen opgesteld die bijdragen aan de beantwoording van de deelvraag.

1. Het verschil tussen het basismodel en het calamiteitenmodel is het grootst bij een CC2-constructie.
2. De staalconstructie van calamiteitenmodel 1 (CC2) is nagenoeg gelijk aan de staalconstructie van calamiteitenmodel 2 (CC3).

In de volgende paragrafen worden deze hypothesen onderzocht. Uit de conclusie zal blijken of de berekeningen deze hypothesen ondersteunen of tegenspreken.

¹² De unity check is het verhoudingsgetal tussen de optredende en opneembare waarde.

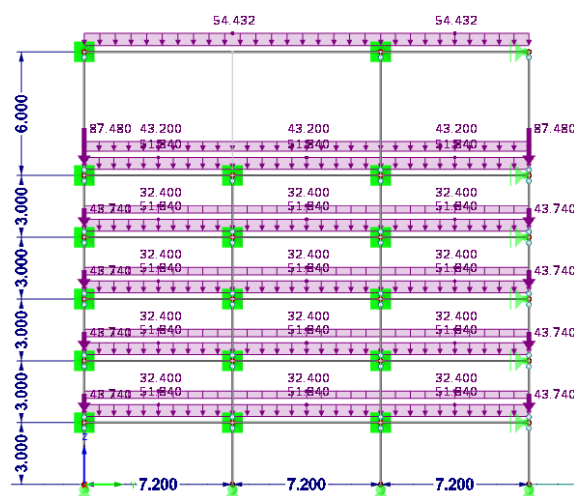
¹³ De momentcapaciteit zorgt ervoor dat de boutverbinding een bepaalde vervorming kan opnemen zonder dat het bezwijkt. Zie voor de berekening Bijlage C1 Toetsing tweede draagweg ‘§1.7.3’.

6.2 Basismodel

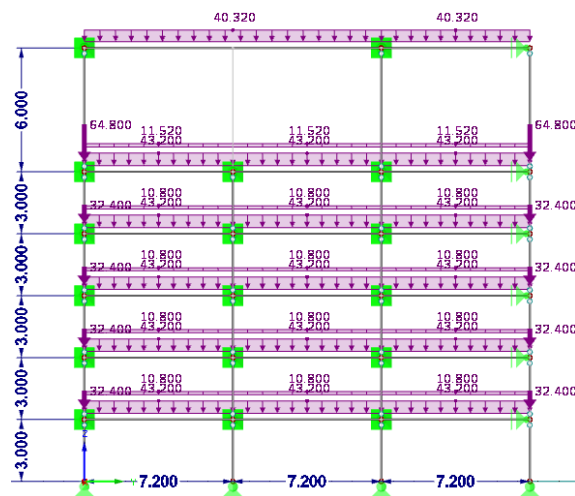
Voor de nulmeting is het raamwerk van basismodel 1 berekend in de normale, blijvende ontwerpsituatie. Het raamwerk is getoetst in de UGT (op sterkte) en in de BGT (op vervormingen) met de belastingcombinaties volgens gevolgklasse CC2.

De kolommen en liggers zijn in eerste instantie gedimensioneerd met behulp van schattingsregels voor overspanningsconstructies in staal (zie voor de berekening Bijlage C1 *Toetsing tweede draagweg* '§1.7.1.a'). Vervolgens zijn de geschatte profielen voor een gedetailleerde raamwerkberekening in RFEM gezet (zie voor volledige berekening Bijlage C1 *Toetsing tweede draagweg* '§1.7.1.b'). De schematisering in RFEM met de maatgevende belastingcombinaties is:

- In de UGT, volgens *Figuur 23: Mechanicaschema raamwerk in de UGT*;
- In de BGT, volgens *Figuur 24: Mechanicaschema raamwerk in de BGT*.

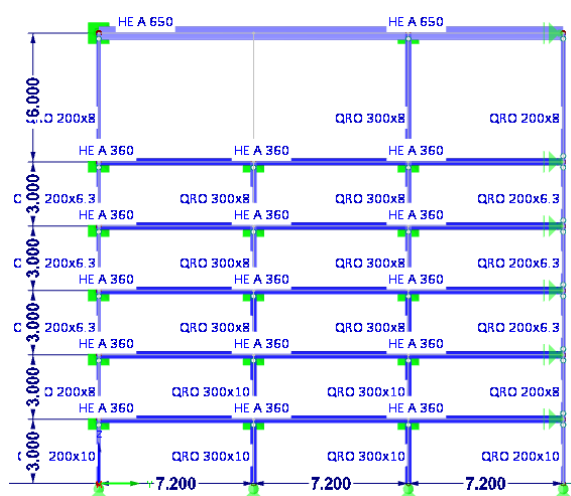


Figuur 23: Mechanicaschema raamwerk in de UGT



Figuur 24: Mechanicaschema raamwerk in de BGT

Om de geschatte profilering van bovenstaande mechanicamodellen te controleren, zijn de modellen ingevoerd in RFEM om de aanwezige momenten en vervormingen te bepalen. Met behulp van deze resultaten zijn handmatig, middels Excelsheets, de profielafmetingen bepaald. Getracht is om de profielen zo licht mogelijk te dimensioneren, om de kosten beperkt te houden. *Figuur 25: Overzicht staalprofielen raamwerk* geeft de berekende staalprofielen van het raamwerk van basismodel 1 weer.



Figuur 25: Overzicht staalprofielen raamwerk

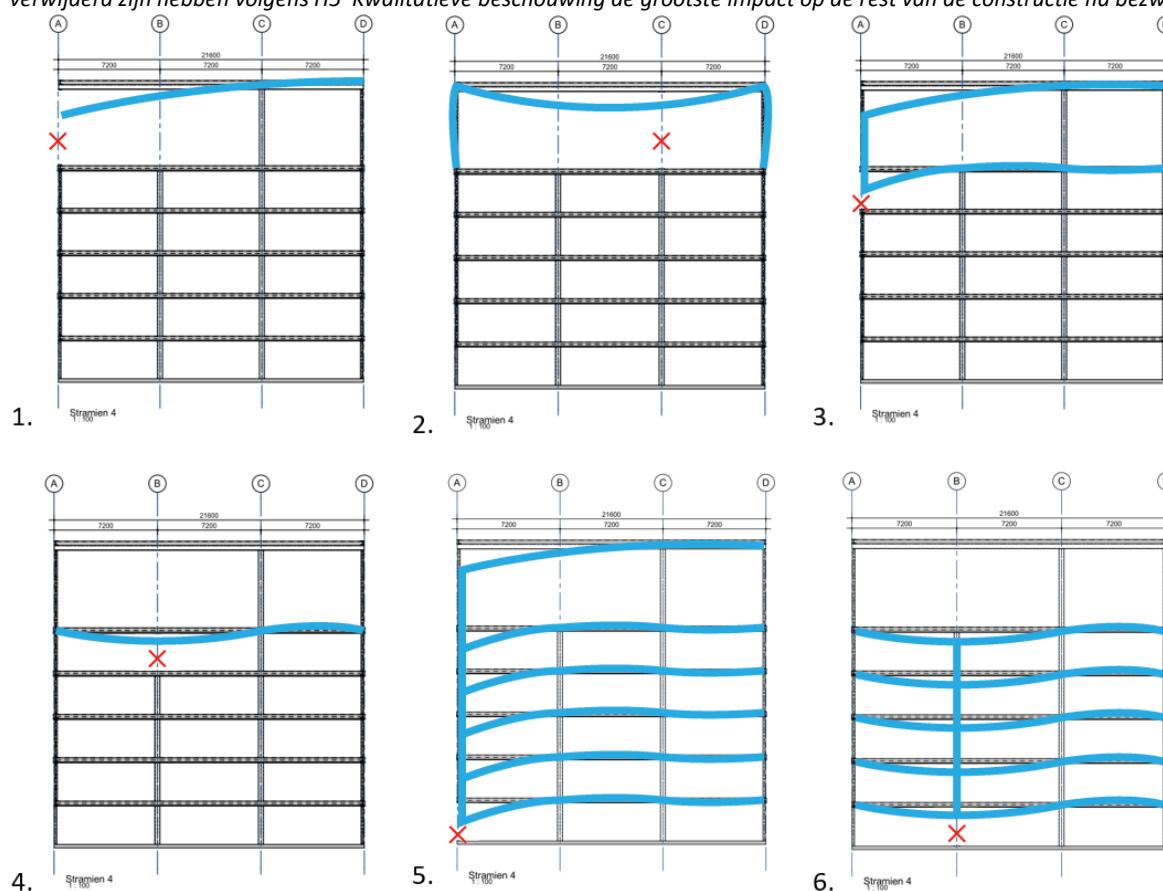
6.3 Calamiteitenmodel

In deze paragraaf wordt het raamwerk van basismodel 1 berekend in de buitengewone ontwerpsituatie volgens gevolgklasse CC2. Op diverse plaatsen in het raamwerk wordt de tweede draagweg getoetst. Hiervoor zijn zes buitengewone ontwerpsituaties opgesteld, zoals weergegeven in *Figuur 26*:

Buitengewone ontwerpsituaties met globale vervormingen:

1. Bezijken eindkolom onder de dakvloer
2. Bezijken tussenkolom onder de dakvloer
3. Bezijken eindkolom onder de vijfde verdiepingvloer
4. Bezijken tussenkolom onder de vijfde verdiepingvloer
5. Bezijken eindkolom onder de 1^e verdiepingvloer
6. Bezijken tussenkolom onder de 1^e verdiepingvloer.

Vanwege het geringe tijdsbestek is voor dit onderzoek niet elk afzonderlijk element verwijderd. De kolommen die wel fictief verwijderd zijn hebben volgens H5 Kwalitatieve beschouwing de grootste impact op de rest van de constructie na bezijken.



Figuur 26: Buitengewone ontwerpsituaties met globale vervormingen

Het RFEM raamwerk van het basismodel wordt in iedere ontwerpsituatie in de plastische fase getoetst, met de buitengewone belastingcombinaties volgens gevolgklasse CC2. Daarna is elke ontwerpsituatie robuust gemaakt door een tweede draagweg te toe passen. Daarvoor zijn in elke ontwerpsituatie de volgende opties beschouwd:

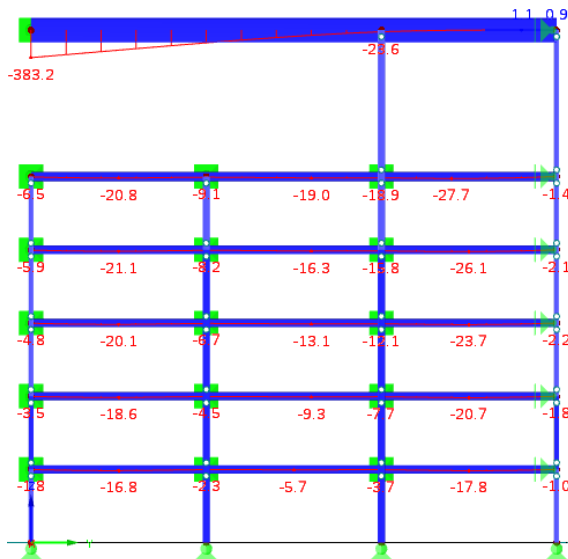
- verzwaren ligterprofiel (vergroten of versterken);
- verbinding laten vloeien;
- verbinding momentvast maken;
- kolom beschouwen als key-element.

In Bijlage C1 *Toetsing tweede draagweg '§1.8'* is de uitgebreide toetsing van het raamwerk in de buitengewone ontwerpsituaties te vinden.

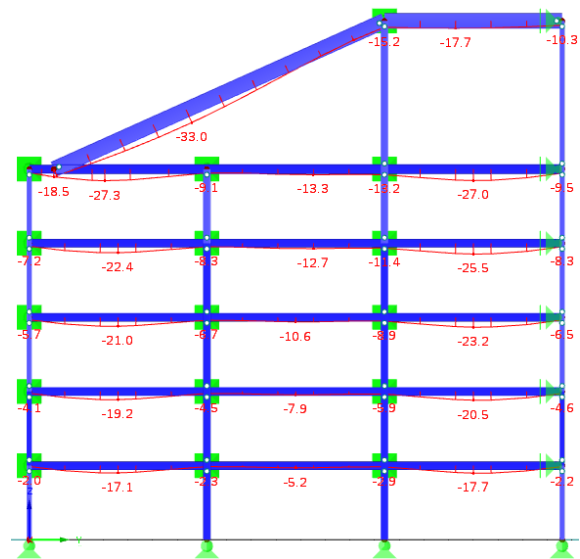
6.3.1 Beschouwing buitengewone ontwerpsituatie 1

In deze ontwerpsituatie is een eindkolom onder de dakhoeft weggehaald. De volgende twee opties zijn beschouwd voor het verkrijgen van een tweede draagweg:

- optie A: verzwaren profiel daklijger, volgens *Figuur 27: Vervormingslijn raamwerk optie A*;
- optie B: verbinding laten vloeien, volgens *Figuur 28: Vervormingslijn raamwerk optie B*.



Figuur 27: Vervormingslijn raamwerk optie A



Figuur 28: Vervormingslijn raamwerk optie B

Waar de meeste constructeurs standaard voor optie A gaan, kijkt dit onderzoek verder naar andere (misschien minder voor de hand liggende) mogelijkheden, zoals optie B.

Dit resulteert in een oplossing die niet alleen economisch interessanter is (minder kilo's staal), maar ook beter aansluit op de werkelijkheid en daardoor realistischer is dan de erg conservatieve oplossing bij optie A.

Enige kanttekening hierbij is, dat door het vloeien van de verbinding, wordt toegelaten dat de dakconstructie lokaal bezwijkt. De grens van toelaatbaar lokaal bezwijken is behandeld in §3.2 *Disproportionele schade*. Voor het basismodel geldt:

Maximale dakoppervlakte dat mag bezwijken volgens de richtlijn is:

$$43,2 [l] * 21,6 [b] = 933 \text{ m}^2 * 15\% = 140 \text{ m}^2 < 100 \text{ m}^2 \rightarrow 100 \text{ m}^2.$$

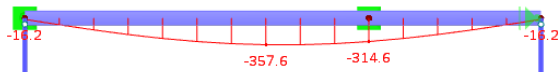
Het bezwijken oppervlak is $14,4 * 7,2 = 103 \text{ m}^2$.

$103 \text{ m}^2 > 100 \text{ m}^2$, omdat het een richtlijn betreft, wordt de instorting gezien als acceptabel.

Het effect van optie B zal geleidelijk verlopen. De vloeren en naastgelegen raamwerken komen bij dit mechanisme namelijk ook in actie, wat ervoor zorgt dat de balk niet met een grote klap naar beneden komt gevallen en daarmee geen grote impact plaatsvindt (stootcoëfficiënt). Dit principe is qua belastingen buiten beschouwing gelaten. Het effect van optie B kan ook optreden wanneer een van de onderste kolommen bezwijkt. Er ontstaat overbelasting, een vloei-moment en de ligger zakt op de volgende vloer/raamwerk. De grens van toelaatbaar lokaal bezwijken wordt hierdoor wel verlegd.

6.3.2 Beschouwing buitengewone ontwerpsituatie 2

In deze ontwerpsituatie is een tussenkolom onder de dakvloer weggehaald. Hierdoor wordt de overspanningslengte van de ligger groter en ontstaat het mechanicaschema: ligger op twee steunpunten (zie voor de beeldvorming *Figuur 29: Vervormingslijn dakligger in buit. ontwerpsit. 2*). De aanwezige dakligger kan de grotere overspanning niet aan en is daarom opnieuw berekend. Hierbij is ook gekeken naar de optie om de verbinding momentvast te maken.



Figuur 29: Vervormingslijn dakligger in buit. ontwerpsit. 2

Uit de berekening blijkt dat, ten opzichte van scharnierende knopen, bij momentvaste knopen de ligger voldoet bij slechts één slag verzwaring. De aanwezige kolommen kunnen de extra krachten van de bezweken kolom en het moment ten gevolge van de inklemming weerstaan en blijven gehandhaafd. Wanneer er enkel naar het extra aantal kilo's staal wordt gekeken, is de optie met momentvaste knopen economisch het voordeligst.

6.3.3 Beschouwing buitengewone ontwerpsituatie 3

In deze ontwerpsituatie is een eindkolom onder de vijfde verdiepingvloer weggehaald. De volgende drie opties zijn beschouwd voor het verkrijgen van een tweede draagweg:

- optie A: verzwaren profiel liggers;
- optie B: verbinding laten vloeien;
- optie C: kolom beschouwen als key-element.

Uit de berekeningen blijkt dat, met het verzwaren en het laten vloeien van de dakligger en de ligger van de vijfde verdiepingvloer, de constructie nog steeds niet voldoet in de nieuwe situatie. Voor de dakligger is het zwaarst gangbaar profiel: een HE1000M toegepast, maar zelfs die bezwijkt bij het aanwezige moment. Daarnaast mag de ligger van de vijfde verdieping niet groter worden dan een HE400A (circa 400 mm) in verband met de vrije verdiepingshoogte van 2,6 meter.

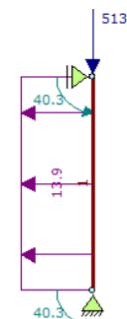
Omdat een tweede draagweg in deze ontwerpsituatie met een aanpassing aan de liggers en verbindingen niet haalbaar is, wordt gekeken naar een alternatieve oplossing (optie C). De eindkolom wordt beschouwd als een key-element. De kolom wordt getoetst met een extra horizontale buitengewone belasting (A_d), zoals weergegeven in *Figuur 30: Toetsing key-element*. Bijlage A van NEN-EN 1991-1-7 beveelt een waarde voor A_d aan van 34 kN/m^2 .

De buitengewone belasting als q-last is:

$$q_d = A_d \cdot \text{breedte kolom} + \text{windbelasting } F_w \cdot \text{hart op hart afstand kolom}$$

$$q_d = 34 \cdot 0,2 + 0,99 \cdot 7,2 = 13,9 \text{ kN/m}^1$$

Bij de toetsing bleek dat de eindkolom van het basismodel voldoet met de hierboven berekende buitengewone belasting. De key-element is hierbij wel een goede oplossing voor de robuustheid.



Figuur 30: Toetsing key-element

6.3.4 Beschouwing buitengewone ontwerpsituatie 4

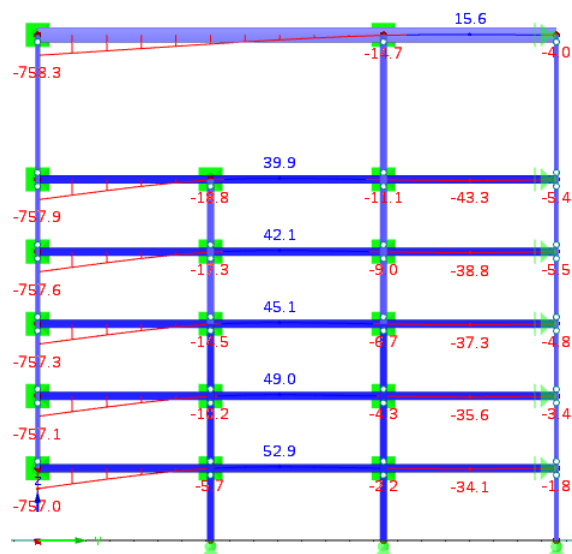
In deze ontwerpsituatie is een tussenkolom onder de vijfde verdiepingsvloer weggehaald. De volgende twee opties zijn beschouwd voor het verkrijgen van een tweede draagweg:

- optie A: verzwaren ligterprofiel;
- optie B: verbinding laten vloeien.

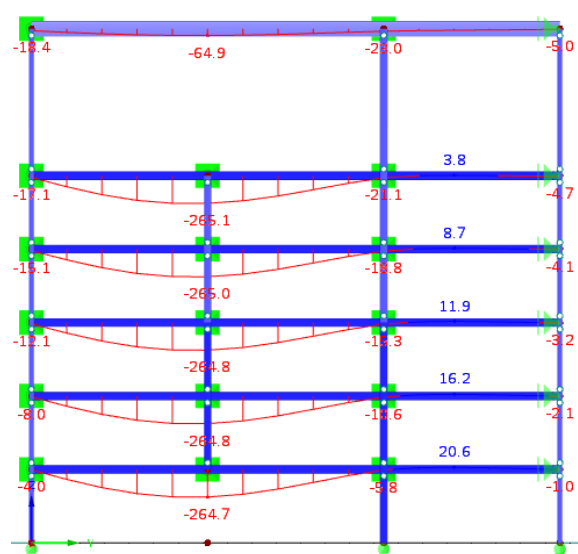
De aanwezige ligter voldoet niet in de nieuwe situatie en moet verzwaard worden. Door het laten vloeien van de verbinding (optie B) ontstaat een plastisch scharnier¹⁴. Het element steunt hierbij nog op de onderliggende kolom, maar vangt uitsluitend de krachten op die op de ligter zelf rusten. De ligter voegt niets meer toe aan de samenhang van de constructie. Hierdoor is optie B gunstiger dan optie A, waarbij de ligter nog wel mee doet in de totale krachtsafdracht en dus meer belasting opneemt. De aanwezige kolommen blijven in beide situaties gehandhaafd.

6.3.5 Beschouwing buitengewone ontwerpsituatie 5

In deze ontwerpsituatie is een eindkolom onder de 1^e verdiepingsvloer weggehaald. Uit de berekening blijkt dat het wegvallen van de kolom invloed heeft op alle liggers van het raamwerk, zoals weergegeven in *Figuur 31: Vervormingslijn raamwerk in buit. ontwerpsit. 5*. Alle verdiepingen helpen mee aan het opvangen van de onderste verdieping bij het wegvallen van de kolom. Net als bij buitengewone ontwerpsituatie 3, is het vergroten van de liggers binnen de gestelde uitgangspunten niet mogelijk. In deze ontwerpsituatie is een tweede draagweg met gangbare HE-profielen niet haalbaar. Om de constructie toch te voorzien van voldoende robuustheid in de buitengewone ontwerpsituatie wordt, net als bij buitengewone ontwerpsituatie 3, de eindkolom beschouwd als key-element. Bij de toetsing bleek dat de eindkolom van het basismodel voldoet in de nieuwe situatie.



Figuur 31: Vervormingslijn raamwerk in buit. ontwerpsit. 5



Figuur 32: Vervormingslijn raamwerk in buit. ontwerpsit. 6

¹⁴ Het steunpuntsmoment is groter dan het plastisch moment van de ligter, waardoor het scharnier bezwijkt.

6.3.6 Beschouwing buitengewone ontwerpsituatie 6

In deze ontwerpsituatie wordt een tussenkolom onder de vijfde verdiepingvloer weggehaald. De volgende twee opties zijn beschouwd voor het verkrijgen van een tweede draagweg:

- optie A: verzwaren liggerprofiel;
- optie B: verbinding laten vloeien.

Uit de berekening blijkt, net als bij voorgaande ontwerpsituatie 5, dat het wegvallen van de kolom invloed heeft op alle liggers van het raamwerk, zoals weergegeven in *Figuur 32: Vervormingslijn raamwerk in buit. ontwerpsit. 6*.

Alle verdiepingen helpen mee met het opvangen van de onderste verdieping bij het wegvallen van de kolom. De liggers dienen in deze situatie geconstrueerd te worden volgens optie A.

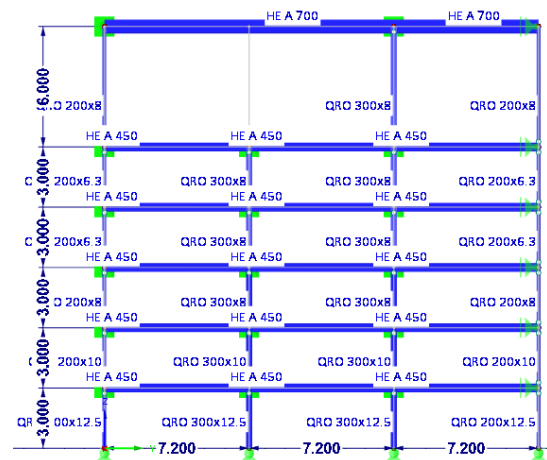
Het laten vloeien van de verbinding op de eerste verdieping (optie B) werkt namelijk negatief, omdat ophanging in dat geval niet meer mogelijk is.

Bij optie A is berekend dat voor de vloerliggers minimaal een HE450A (circa 450 mm) toegepast moet worden. De maximale hoogte voor de liggers mag, ten behoeve van de minimale vrije hoogte van 2,6 meter, eigenlijk zijn: $3,0 \text{ m.} - 2,6 \text{ m.} = 0,4 \text{ meter}$, ofwel een HE400A. Met de HE450A ligger komt de verdiepingshoogte uit op 3,05 meter.

Mocht dit een issue zijn, dan blijven de aanwezige liggers gehandhaafd en wordt de tussenkolom beschouwd als een key-element. In deze beschouwing is gekozen voor de profilering behorende bij optie A.

6.3.7 Combinatiemodel 1 (CC2)

De maatgevende profielen uit de zes beschouwde buitengewone ontwerpsituaties zijn verwerkt in één samengesteld raamwerk, zoals weergegeven in *Figuur 33: Raamwerk combinatiemodel 1*. Dit raamwerk is nogmaals gecontroleerd in de maatgevende buitengewone ontwerpsituaties 2, 4 en 6. Volgens de berekening (Bijlage C1 *Toetsing tweede draagweg '§1.8.7'*) is het samengestelde raamwerk voldoende robuust in de beschouwde buitengewone ontwerpsituaties.



Figuur 33: Raamwerk combinatiemodel 1

6.4 Resultaat

Impact

Tabel 9: *Overzicht impact* toont de impact in extra kilo's staal tussen de beschouwde modellen. Uit de vergelijking volgt dat, voor de beschouwde buitengewone ontwerpsituaties, bij basismodel 1 door gebruik van 17,5% meer staal het raamwerk robuust kan worden gemaakt. Bij basismodel 2 kan dat door toepassing van 16,4% extra staal. Beide percentages zullen in werkelijkheid lager liggen. Zoals eerder vermeld is de tweede draagweg alleen gezocht in het raamwerk zelf (2D). Feitelijk draagt de hele constructie bij aan de alternatieve krachtsafdracht. Hiermee wordt hypothese 1 bekrachtigd. Voor een profieloverzicht van de raamwerken zie Bijlage C1 *Toetsing tweede draagweg '§1.11'*.

Tabel 9: Overzicht impact

Ontwerpsituatie	Raamwerk		Extra kilo's	
	Model 1 (CC2) kg	Model 2 (CC3) kg	kg	kg
Normale (basismodel)	20925,0	21394,8	469,8	2,2
Buitengewone (calamiteitenmodel)	24588,0	24912,0	324,0	1,3
Extra kilo's	kg %	3663 17,5	3517,2 16,4	

In de tabel is af te lezen dat het verschil in kilo staal tussen basismodel 1 en 2 (in de normale ontwerpsituatie) slechts 2,2% bedraagt. Dit komt mede door de verschillende veiligheidsfactoren en de afwijkende gebruiksfunctie van de vijfde verdieping.

Het verschil in hoeveelheid staal tussen calamiteitenmodel 1 en 2 (in de buitengewone ontwerpsituaties) bedraagt slechts 1,3%. Dit verschil is geheel gerelateerd aan de zwaardere veranderlijke belasting op de vijfde verdieping bij model 2 (andere gebruiksfunctie). Op de ligger van de vijfde verdieping na, wat de extra 324 kg staal geeft, zijn de profielen van beide calamiteitenmodellen gelijk. Hiermee wordt hypothese 2 bekrachtigd.

Beton

Zoals eerder gezegd, zijn er geen berekeningen gemaakt voor beton, omdat deze

1. al vaker gemaakt zijn en
2. waarschijnlijk overeenkomen met de berekeningen van staal.

De resultaten van de tweede draagweg toetsing volgens *Tabel 9: Overzicht impact* zullen bij een betonnen raamwerk ongeveer in dezelfde orde van grootte qua extra kosten zijn. Bij de berekening gaat het vooral om de verhouding van de momenten, die, wanneer het stalen raamwerk in beton is uitgevoerd, nagenoeg gelijk zijn.

Key-element

De toepassing van een tweede draagweg blijkt bij de beschouwde ontwerpsituaties met slechts één aanpassing aan de liggers en verbindingen niet haalbaar. Hoewel de meeste experts twijfelen aan de kwaliteit van key-elements, ontkom je hier niet altijd aan. Hoofdzakelijk bij situaties waarbij een eindkolom bezwijkt, moet de betreffende kolom beschouwd worden als key-element.

6.5 Beantwoording deelvraag

Welke invloed heeft het wegvallen van een dragend element op het gedrag van een (staal)-constructie?

De impact op de gehele raamwerkconstructie blijkt het grootst, wanneer op de begane grond een kolom wordt weggehaald. De hele constructie helpt mee met het opvangen van de onderste verdieping, wat gevolgen heeft voor de profilering van de liggers en kolommen. Daarnaast tonen de berekeningen aan, dat voor het beschouwde model een minimale verdiepingshoogte van 3,05 meter nodig is, om de tweede draagweg in het raamwerk te garanderen.

In situaties waarbij een eindkolom bezwijkt, worden de spanningen in de liggers te groot. De eindkolommen mogen daarom niet bezwijken en dienen volgens de norm als key-element te worden beschouwd. Hierbij moet wel opgemerkt worden dat de samenhang van het totale bouwwerk bij de berekeningen niet is meegenomen.

7 CONCLUSIE EN AANBEVELINGEN

We kunnen in Nederland gerust stellen dat er constructief eerst wat flink mis moet gaan, voordat de juiste maatregelen getroffen worden. Denk aan:

Gebeurtenis:

Watersnoodramp in 1953 met veel dodelijke slachtoffers tot gevolg.

Brand in de Mont-Blanc tunnel in 1999 met 41 dodelijke slachtoffers tot gevolg.

Instorting van de bollenplaatvloeren bij de parkeer-garage in Eindhoven (2017), gelukkig zonder dodelijke slachtoffers.

Gevolg:

Intreding van de Deltawerken.

Bijstellen van de brandvoorschriften.

Herzien detailleringsregels voor breed-plaatvloeren.

Het is van de zotte dat een constructie eerst moet bezwijken (met dodelijke slachtoffers tot gevolg), voordat de maatregelen genomen worden, die al veel eerder genomen hadden moeten worden. Heel constructief Nederland weet beter, maar blijft – zolang er geen juiste normen opgenomen zijn in het bouwbesluit – de andere kant op kijken. Als de overheid niet in actie komt, is het wachten tot de media ons weer een grote bouwblunder meldt, met veel dodelijke slachtoffers tot gevolg.

Ook in de bouwwereld geldt “voorkomen is beter dan genezen!”. Daarom geeft dit rapport advies over het voorkomen van voortschrijdende instorting door een onbekende oorzaak.

Eenduidigheid tussen experts

Dankzij de interviews ten behoeve van het praktijkonderzoek zijn onduidelijkheden uit de norm met betrekking tot onbekende buitengewone belastingen opgehelderd (zie Bijlage *B1 Interviews*). De verschillende vakexperts zijn eensgezind: iedereen is het eens met verplichtstelling van de in de Eurocode gestelde toetsingseisen voor onbekende buitengewone belastingen in het Bouwbesluit. Om een constructie hiertegen te wapenen (ofwel robuust te maken) noemen de experts de tweede draagweg als beste methode.

Kleine financiële impact

Het standpunt dat de toepassing van een tweede draagweg een flinke duit in de buidel is, wordt weerlegd in de kwantitatieve beschouwing (§6.4 *Resultaat*). Een gebouw voorzien van deze robuustheidsmethode bedraagt ‘slechts’ circa 15% extra materiaalkosten. Met inachtneming van de zienswijze dat plastische vervorming toegestaan is en waar een tweede draagweg niet mogelijk is, worden de kolommen als key-element beschouwd. Bovendien mag -volgens de gestelde indicatieve grenzen uit de Eurocode- lokale instorting plaatsvinden.

De bovengenoemde bevindingen zijn dé bouwstenen voor het opzetten van een nieuwe regeling.

7.1 Voorstel eenduidige regelgeving

Voor het onderzoek zijn veel Nederlandse toonaangevende vakexperts gesproken, die hun deskundigheid over voortschrijdende instortingen door een onbekende oorzaak hebben laten zien. Het wordt tijd dat zij collectief opstaan en op basis van hun kennis en ervaring met dit onderwerp samen een bijdrage leveren in de verbetering van het Bouwbesluit en het toekomstgericht en veilig bouwen. Op basis van de betrokkenheid bij het onderwerp en de gegeven antwoorden in de interviews wordt een commissievorming van onderstaande experts geadviseerd:

- Dick Bezemer (Gemeente Rotterdam)
- Rene Braam (TU Delft / Adviesbureau ir. J.G. Hageman BV)
- Johan Galjaard (ABT)
- Ton Vrouwenvelder (TU Delft / TNO Bouw)
- Joost Walraven (TU Delft)
- Simon Wijte (TU Eindhoven / Adviesbureau ir. J.G. Hageman BV)
- Patrick Willemen (Gemeente Rotterdam)

De commissie zou zich moeten buigen over een eenduidige omschrijving betreffende de omgang met disproportionele instorting bij een onbekende oorzaak, geldend als nationale norm in het bouwbesluit. Deze voor heel Nederland geldende regel moet geen ruimte overlaten voor eigen interpretaties en discussies over constructieve keuzes voorkomen (vooraf, maar ook na een instorting). Deze preventieve norm dwingt ontwerpteams tot het veiliger maken van alle nieuwe bouwwerken, wat uiteindelijk het voornaamste doel is van ons vakgebied.

Het in de praktijk brengen van nieuwe norm ter voorkoming van disproportionele instorting bij een onbekende oorzaak maakt een constructeur beter bewust van zijn/haar handelen. Een groot voordeel, omdat het meer robuust maken van een bouwwerk verder gaat dan het berekenen van individuele elementen, dat ten goede komt voor de samenhang in de constructie.

Er is nog een lange weg te gaan, willen alle grijze gebieden opgehelderd zijn. Maar mocht het zover komen gaat het veel opleveren: grote bouwfouten worden voorkomen en instortingen beperkt. Het gaat levens redden. Daarom is het bouwbesluit aanvullen met een norm over voorkoming van disproportionele instorting bij een onbekende oorzaak, een knap staaltje werk!

7.2 Beantwoording hoofdvraag

De hoofdvraag van het afstudeeronderzoek luidt:

Welke impact hebben de gevolgen van onbekende buitengewone belastingen op de constructie van bouwwerken volgens gevolgklasse CC2 en CC3?

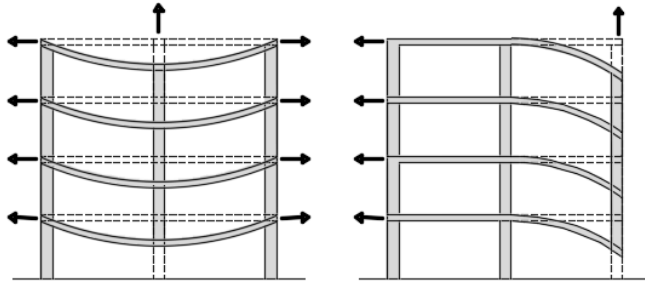
In dit onderzoek is 'het bezwijken van kolommen' als voorbeeld genomen, ter illustratie van het gevolg van een onbekende buitengewone belasting door menselijke fouten.

Impact per locatie

De impact die het bezwijken met zich meebrengt is afhankelijk van zowel de verdieping als de locatie van het element.

Verdieping:

- Bovenste verdieping: Wanneer een kolom op de bovenste verdieping bezwijkt, merkt de onderliggende constructie daar nauwelijks iets van: slechts de dakligger gaat doorbuigen. De krachtsafdracht naar de fundering toe wordt geleidelijk verdeeld over de onderliggende constructie-elementen.
- Begane grond: De impact is het grootst wanneer een kolom op de begane grond bezwijkt. De bovenliggende constructie-elementen vangen de belasting van de onderste verdieping op: de trekbanden worden in werk gesteld (zie *Figuur 34: Principe trekbanden*).



Figuur 34: Principe trekbanden

Locatie:

Ook de locatie van het bezwijken op de verdieping zelf speelt een rol. De elementen die bij bezwijken de grootste impact veroorzaken bevinden zich in de gevel. Wanneer een gevelkolom (eindkolom) bezwijkt, lopen de krachten in de meeste gevallen zelfs zo hoog op, dat een tweede draagweg op dezelfde stramien niet te realiseren is. De constructie dient dan via een alternatieve methode robuust te worden gemaakt:

- Een oplossing kan gezocht worden in de stramien die haaks op de beschouwde stramien staat.
- Een andere methode is het toepassen van een key-element. Een methode die eigenlijk niets toevoegt aan de samenhang van de constructie, maar die er wel voor zorgt dat het beschouwde element een extra belasting kan weerstaan.

Impact per gevolgklasse

Zoals in §6.4 *Resultaat* wordt aangetoond is de impact ten gevolge van een onbekende buitengewone belasting op een CC3-bouwwerk kleiner dan een CC2-bouwwerk, namelijk 17,5% om 16,4%. De CC3-constructie bezit met haar grote belastingsfactoren in de normale ontwerpsituatie al meer robuustheid dan een CC2-constructie. Dit werkt in het voordeel in een buitengewone ontwerpsituatie, waarbij voor beide gevallen alle belastingsfactoren gelijk worden gehouden.

Eis robuustheid

Wat niet vergeten mag worden is dat NEN-EN 1991-1-7 ten behoeven van robuustheid eisen stelt op de manier waarop een de onbekende buitengewone belasting in het ontwerp meegenomen dient te worden. Deze maatregelen zijn afhankelijk van de gevolgklasse. De verschillen tussen gevolgklassen uiten zich dus niet slechts in factoren maar ook in de mate van beschouwen.

7.2.1 Impact reduceren

Zoals bij §7.1 wordt gesteld kan een aanvulling op het Bouwbesluit over de omgang met disproportionele instorting bij een onbekende oorzaak toekomstige bouwfouten en instorting voorkomen. De introductie van een algemeen geldende norm dwingt iedere constructeur de mogelijke impact als gevolg van onbekende buitengewone belastingen te reduceren. De hieronder beschreven werkwijze om de impact te reduceren, kan als input dienen bij het opstellen van een eenduidige regelgeving.

Om de impact van de gevolgen van de onbekende buitengewone belastingen te reduceren moet een constructie voldoende robuust gemaakt worden. Voor het voldoende robuust maken van een constructie, moet gekeken worden naar de samenhang van de gehele constructie. Start daarom altijd met het maken van een risicoanalyse om te beoordelen waar de belastingrisico's zich bevinden is (en waar de constructie dus meer robuust moet worden). Toets de uitkomsten in eerste instantie op de toepasbaarheid van een tweede draagweg. Dit is de meest betrouwbare methode om samenhang te verzekeren én is controleerbaar en objectief.

Waar het toepassen van een tweede draagweg in de constructie niet mogelijk is, is het toch aan te raden deze belasting als individuele element (key-element) te beschouwen. Hoewel dit niet de voorkeur heeft, is het in sommige situaties niet te voorkomen een element individueel te beschouwen. De constructie zal hierdoor minder samenhangen, maar met deze absolute zekerheid door een combinatie van beide methoden is de constructie voldoende bewapend tegen onbekende buitengewone belastingen.

8 NAWOORD

Na een periode van vier maanden kunnen we zeggen dat we het onderzoek naar het begrip *robuustheid* als zeer interessant ervaren hebben. Waar we aanvankelijk slechts *de tweede draagweg* als afstudeeronderwerp wilden behandelen, is tijdens het maken van de literatuurstudie gebleken dat de problematiek rondom deze methode verder gaat dan de toepassing zelf. De verbreding van het afstudeeronderwerp had voorkomen kunnen komen wanneer er vooraf meer research naar het onderwerp had plaatsgevonden.

De verbreding van het onderwerp zorgde ervoor dat niet alle neuzen dezelfde kant op stonden. De afstudeerbegeleider vanuit Volantis prefereerde een wetenschappelijk onderzoek terwijl de afstudeerbegeleiders vanuit de HAN ons benadrukten om het onderzoek praktisch te houden. Uiteindelijk zijn we tot een compromis gekomen waar alle partijen, inclusief wij zelf, gelukkig mee zijn.

Voor dit onderzoek hebben er gesprekken met zeer toonaangevende experts plaatsgevonden. We waren blij verrast dat het grootste deel van de ondervraagden zeer enthousiast was dat wij dit onderwerp aanpakten. Na vrijwel elk gesprek kregen we de vraag of we het rapport na afronding door wilde sturen. Dit motiveerde ons om een goed rapport neer te zetten!

Een wijze les uit het onderzoek is dat we meer stil moeten blijven staan bij het beoordelen van bouwconstructies. Op school leerden wij om te rekenen volgens de normen en in onze ogen was de Eurocode daarom heilig. Het onderzoek heeft ons geleerd verder te kijken dan de normen en altijd een kritische houding aan te nemen.

Ten slotte kijken we met plezier terug op de voorspoedige samenwerking tijdens de gehele afstudeerperiode. We begonnen het onderzoek allebei zeer gemotiveerd en met hetzelfde doel: gaan voor die 10! Deze lijn hebben we de gehele periode vast weten te houden en samen zijn we tot het resultaat gekomen zoals het er nu bij ligt.

Want niet alleen robuustheid maar ook het komen tot dit afstudeerrapport is een knap staaltje werk!

Rick Dielissen
Suzan van den Winkel

Arnhem, 28 mei 2018

9 BRONNENLIJST

Artikelen

- Beertsen, H. & Bout, P. (2014). *Rotterdam centraal (3): Hoofdopzet*. Bouwen met staal.
- Bezemer, D. (2016). *Het belang van bouwvoorschriften*. Cement.
- Bezemer, D. & Willemen, P. (2015). *Robuust Rotterdam*. Cement.
- Caulil, E. van (2017). *Hoe robuust ontwerpt u?*. Cement.
- Doomen, R. (2016). *3.850 ton staal houdt 'zwevende wolk van glas' overeind in Timmerhuis*. Bouw-kroniek (B).
- Doomen, R. (2016). *Woonwerkgebouw Timmerhuis, Rotterdam*. Bouwen met staal.
- FEBE (2012). *Ontwerpen van prefabgebouwen om voortschrijdende instorting bij accidentele acties te voorkomen*. Beton (B).
- Hoorn, H. (2013). *Stadskantoor Utrecht (1): Constructief ontwerp*. Bouwen met staal.
- Linssen, J. (2016). *Rondetafelgesprek over verantwoordelijkheid bouw en overheid*. Cement.
- Linssen, J. & Vrouwenvelder, T. (2015). *Het gelijk van probabilistiek*. Cement.
- Terwel, K. (2015). *Robuustheid is geen unity check*. Cement.
- Tissink, A. (2017). *Onderzoek instorting parkeergarage Eindhoven afgerond*. Cobouw.
- Vambersky, J. (2015). *Robuustheid van constructies*. Cement.
- Velden, F. van (2009). *Instorting bioscoop door redundantie voorkomen*. Cobouw.
- Velden, F. van (2014). *Discussie over robuustheidsconstructies duurt voort*. Cobouw.
- Wijte, S. & Lurvink, M. (2016). *Op weg naar een nieuwe generatie Eurocodes*. Cement.
- Wijte, S. (2015). *Eisen aan robuustheid*. Cement.

Internet

- Eindhovens Dagblad (2017). *Deel parkeergarage Eindhoven Airport ingestort, geen gewonden, vlieg-verkeer normaal*. Geraadpleegd op 8 februari 2018, van <https://www.ed.nl/eindhoven/deel-parkeergarage-eindhoven-airport-ingestort-geen-gewonden-vliegverkeer-normaal~a1131e12/>
- NRC (2003). *Fout fundering balkons Maastricht*. Geraadpleegd op 5 maart 2018, van <https://www.nrc.nl/nieuws/2003/06/07/fout-fundering-balkons-maastricht-7641905-a1126018>
- NEN (2012). *Overzicht van welke Eurocodes welke TGB-normen vervangen (pdf)*. Geraadpleegd op 9 februari 2018, van <https://www.nen.nl/NEN-Shop/Eurocodes.htm>
- Pierik, T. (2017). *Instorting parkeergarage Eindhoven Airport; incident of trend?*. Geraadpleegd op 19 februari 2018, van <http://www.cae.nl/instorting-parkeergarage-eindhoven-airport-incident-of-trend/>
- Encyclopex (2018). *Probabilisme*. Geraadpleegd op 14 februari 2018, van <http://www.encyclopex.com/probabilisme/>
- Railpedia (2010). *BLEVE*. Geraadpleegd op 14 februari 2018, van http://www.infrasite.nl/definitions/definition.php?ID_content=137
- Scenarioboek Externe Veiligheid (2017). *Veiligheidsregio's in de provincies Noord-Holland, Flevoland en Utrecht*. Geraadpleegd op 15 februari 2018, van <http://www.scenarioboek.nl/>
- Welleman, J. (2016). *Collegestof, plasticiteitsleer les 3*. Geraadpleegd op 13 maart 2018, van http://icozct.tudelft.nl/TUD_CT/CT3109/collegestof/plasticiteitsleer/files/les3.pdf
- Welleman, J. (2016). *Collegestof, plasticiteitsleer les 1 & 2*. Geraadpleegd op 13 maart 2018, van http://icozct.tudelft.nl/TUD_CT/CT3109/collegestof/plasticiteitsleer/files/les1-2.pdf
- Technosoft. Geraadpleegd op 28 mei 2018, van <https://www.technosoft.nl/rekensoftware/producten/verbindingen>

Normen

Eurocode 0: Grondslagen - *NEN-EN 1990 Grondslagen van het constructief ontwerp* (2012). Het Nederlands Normalisatie-instituut.

Eurocode 1: Belastingen op constructies - *NEN-EN 1991-1-1 Dichtheden, eigen gewicht, opgelegde belastingen* (2012). Het Nederlands Normalisatie-instituut.

Eurocode 1: Belastingen op constructies - *NEN-EN 1991-1-7 Buitengewone belastingen* (2012). Het Nederlands Normalisatie-instituut.

Eurocode 3: Ontwerp en berekening van staalconstructies - *NEN-EN 1993-1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen* (2006). Het Nederlands Normalisatie-instituut.

Eurocode 7: Geotechnisch ontwerp - *NEN-EN 1997-1 Algemene regels* (2005). Het Nederlands Normalisatie-instituut.

Bouwbesluit 2012 (2018). Rijksoverheid.

Boeken en dictaten

Braam, C. (2012). *Cement en beton 4: Ontwerpen in gewapend beton* (2^e druk). Boxtel: Aeneas.

Braam, C. & Lagendijk, P. (2011). *Cement en beton 2: Constructieel gewapend beton* (7^e druk). Boxtel: Aeneas.

Fib, Ernst & Sohn (2013). *Model Code for Concrete Structures 2010* (pag. 316 – 317). Wiley-Vch Verlag GmbH

Snijder, H. & Steenbergen, H. (2011). *Krachtswerking deel 3*. Zoetermeer: Bouwen met staal.

Zijden, K. van der. *Bezwijkanalyse*. Reader 387. Arnhem: Hogeschool van Arnhem en Nijmegen.

Zijden, K. van der. *Mechanica voor de Minor Creatief Construeren*. Reader 6056. Arnhem: Hogeschool van Arnhem en Nijmegen.

Documenten

Anzion, D., Ouden, M. den, & Winnen, L. (2012). *Spelen met vuur*. Arnhem: Hogeschool van Arnhem en Nijmegen.

Arends, I. (2017). *Handleiding ontwerpen draagconstructies*. Delft: TU Delft.

Banga, J. (2012). *Bouwbesluit: Constructieve veiligheid*. Delft: NEN.

Boer, J. de (2012). *Tweede draagweg van een hoekveld in prefab beton*. Eindhoven: TU Eindhoven.

Dijk, M. van (2011). *Voortschrijdende instorting bij prefab betonconstructies*. Eindhoven: TU Eindhoven.

Hennik, P. van (2011). *Tweede draagweg constructie Sanquin*. CAE Nederland B.V.

Hercuton. (2016). *Constructieve uitgangspunten project Image Wharf te Amsterdam*. Nieuwkuijk: Hercuton.

Janssen, B., Janssen, T & Lamers, M. (2012). *Voorkomen is beter dan genezen*. Arnhem: Hogeschool van Arnhem en Nijmegen.

NAM, Zonneveld Ingenieurs, Ingenieursbureau Dijkhuis & Ingenieursbureau Goudstikker - de Vries. (2016). *Het slimme bouwen*. Groningen: NAM.

Rijnders, B. & Geurtsen, E. (2011). *Tweede draagweg in de praktijk*. Arnhem: Hogeschool van Arnhem en Nijmegen.

Wijte, S., Sagel, R., Boer, S. de, Bruin, G., Huyben, R., Roo, A. de, Vollebregt, J., Vrouwenfelder, A, Windt, J. van der & Vambersky, J. (2006). *Constructieve samenhang van bouwconstructies*. Bunschoten: Stufib, 8.

Overig

De ruwbouw groep (2016). Oplegging kanaalplaat op stalen HE-balk. Detail VD38.

Vrouwenfelder, T. & Wijte, S. (2008). *NEN-EN 1991-1-7 Buitengewone Belastingen. Cursus Eurocode*. TNO bouw / TU Delft.

Wijte, S. (2008). *NEN-EN 1991-1-7 bezwijken door een onbekende oorzaak. Cursus Eurocode*. Adviesbureau ir. J.G. Hageman B.V.