

DE TWEEDE DRAAGWEG

ONDERZOEK NAAR REDUNDANTIE BINNEN HET CONSTRUCTIEF ONTWERP

HOOFDVERSLAG

Frielink, Timo

2086689

Opdrachtgever(s) : Volantis B.V.
Avans Hogeschool

Bedrijfsbegeleider(s) : ing. R.H.B. Bouts
ing. G.M.M.G. Sluijsmans
ir. L. Franken

Afstudeerdocent(en) : ir. J. Vreede
ir. A.W.A.M.J. Van den Bogaard

Afstudeeratelier : Constructief ontwerpen BOU

Opleiding : Bouwkunde

Documentnummer : 01

Datum : 14 juni 2018

Status : Definitief

Aantal pagina's : 98



CHANGE THE PERSPECTIVE

Volantis Venlo
Sint Jansweg 20c
Postbus 470
5900 AL Venlo
T 077 351 55 51

Volantis Eindhoven
Fellenoord 25
Postbus 6484
5600 HL Eindhoven
T 040 850 70 20

Volantis Chemelot
Brightlands Campus
Urmonderbaan 20E
6167 RD Geleen
T 043 362 54 44

Volantis BV
IBAN NL45INGB0664287026
BIC INGBNL2A
BTW NL803680387B01
KVK 12033333

mail@volantis.nl
www.volantis.nl



Wij voeren uw opdrachten met zorg uit overeenkomstig DNR 2011.

Voorwoord

Met trots presenteer ik u mijn eindrapport waarmee ik mijn studie Bouwkunde aan de Avans Hogeschool ga afsluiten. Dit onderzoek heb ik gedaan in samenwerking met Volantis B.V. Zij hebben mij tijdens het hele afstudeertraject begeleid.

Het vinden van een onderwerp was een lastige klus. Tijdens mijn stage in het derde jaar heb ik het boek 'Leren van instortingen' gelezen van dhr. Frans van Herwijnen. Door het lezen van dat boek werd ik steeds enthousiaster over het onderwerp robuustheid en de tweede draagweg. Dat onderwerp was nog niet behandeld tijdens mijn studie. Toen in juni 2017 de Grenfell Tower in Londen werd getroffen door brand leek het mij een interessant idee om brandveiligheid aan de robuustheid van constructies te koppelen.

Ik ben op zoek gegaan naar een bedrijf waar ik terecht kon met mijn wensen en ik kwam uit bij Volantis. De keuze voor Volantis was gebaseerd op het feit dat ze een constructieafdeling hebben, maar ook een afdeling met brandveiligheidsexperts. Dat vond ik een ideale combinatie. Brand en constructies zijn twee aparte vakgebieden die ik binnen Volantis heb kunnen combineren.

Daarom wil ik bij deze graag mijn begeleiders vanuit Volantis bedanken en in het bijzonder dhr. Ruud Bouts. Hij heeft mij gedurende het constructieve deel begeleid, wat het grootste deel van mijn onderzoek betrof. Zonder hem was dit onderzoek nooit zo geweest. Daarnaast wil ik graag mevr. Gemma Sluijsmans en mevr. Linda Franken bedanken. Zij hebben mij begeleid tijdens het traject en hebben meegedacht over het brandveiligheidsplaatje. Daar ben ik hen zeer dankbaar voor.

Ik wil daarnaast dhr. Johan Vreede en dhr. André van den Bogaard nog graag bedanken voor hun begeleiding vanuit Avans Hogeschool. Zij zijn regelmatig met goede tips gekomen voor het afstudeeronderzoek. Daarnaast was er altijd tijd om over randzaken te praten.

Als laatste wil ik alle anderen bedanken die op een of andere manier mij geholpen heeft met mijn afstudeeronderzoek.

Ik wens u veel plezier bij het lezen van mijn afstudeerrapport.

Venlo, juni 2018



Timo Frielink

Samenvatting

In de afgelopen decennia zijn meerdere gebouwen ingestort om verschillende redenen. Dat kan veroorzaakt worden door bijvoorbeeld ontwerpfouten, terroristische aanslagen maar ook brand. In 2008 stortte de faculteit Bouwkunde in Delft in ten gevolge van brand. De weerstand tegen dit soort calamiteiten wordt de robuustheid genoemd. Met de ingang van het nieuwe Bouwbesluit in 2012 werden de Eurocodes definitief bekrachtigd. Een constructie moet daardoor robuust genoeg zijn om calamiteiten zoals brand te kunnen weerstaan.

Het doel van dit onderzoek is om inzicht te krijgen in de robuustheid en brandveiligheid van constructies. Verder is onderzocht hoe een constructie draagkrachtig te houden is tijdens brand via een tweede draagweg. Dat wordt gedaan door middel van een casus omtrent bouwdeel B van het Maankwartier te Heerlen. De hoofdvraag luidt daarom:

In hoeverre is de constructie van gebouw B van het Maankwartier te Heerlen via een tweede draagweg draagkrachtig te houden in een buitengewone situatie zoals brand?

Er zijn verschillende opties bekeken en deze opties zijn daarna vergeleken met de constructie onder 'normale' omstandigheden, de zogeheten uiterste grenstoestand. Eerst is er gekeken naar de mogelijkheid om te wapenen aan de hand van de krachtswerking in een calamiteitsituatie. Daarna is er gekeken naar de mogelijkheid om de constructie te dimensioneren op brand. Hierbij is de constructie berekend met een methode, de 500°C-isothermmethode, specifiek voor brand. Als laatste mogelijkheid is de optie om schoren aan te brengen onderzocht. De plaatsing van de schoren kent drie varianten. De eerste twee varianten zijn gebaseerd op een 'ophangconstructie' waarbij er, boven in het gebouw, een trekconstructie voorzien is. Voor de derde variant is er gekeken naar de optie om schoren te plaatsen om een x aantal verdiepingen. X is hierbij een variabele.

Uit de analyse is gebleken dat bouwdeel B van het Maankwartier draagkrachtig te houden is met een tweede draagweg via schoren, maar dat het ook mogelijk is om deze te dimensioneren op brand. Bij alle maatregelen om robuustheid te creëren is er extra wapening nodig in de balken ten opzichte van de uiterste grenstoestand. Wapenen op de calamiteit is de enige optie die niet toepasbaar is binnen het Maankwartier vanwege een te grote krachtswerking.

De conclusie die hieruit getrokken kan worden is dat de constructie draagkrachtig te houden is tijdens brand door te dimensioneren op brand of om schoren aan te brengen. Schoren aanbrengen om een x aantal verdiepingen lijkt in deze studie de beste optie te zijn. Het is belangrijk om te onthouden dat robuustheid geen standaardprocedure is. Elke vorm van robuustheid is uniek en hangt af van vele verschillende factoren. Zo kan de architect verschillende eisen hebben in het ontwerp die één specifieke maatregel tegen brand niet toestaat.

Summary

Several buildings have collapsed over the past decades for various reasons. This can be caused by, for example, design errors, terrorist attacks, but also fire. In 2008, the Faculty of Architecture in Delft collapsed due to fire. The resistance to this type of calamity is called the robustness of structures. With the introduction of the new 'Bouwbesluit' in 2012, the Eurocodes were ratified. A structure has to be robust enough to handle calamities, like, for example, fire

The aim of this graduation research is to gain insight into the robustness and fire safety of structures. Furthermore, we looked at how a structure can be sustained via an alternative bridging mechanism during fire. This has been performed by the examination of the case "*part B of the 'Maankwartier' in Heerlen, the Netherlands*". Therefore the main question of this researchproject is:

To which degree can the structure of part B of the 'Maankwartier' in Heerlen be sustained by a second carrying path in a calamity situation like fire?

Several options were examined for this and these options were then compared with the structure during standard conditions, the so-called ultimate limit state. First, the possibility to apply reinforcement based on the force in a calamity situation was assessed. Secondly, we examined the option to dimension the structure against fire. In this situation the structure has been calculated with a method, specifically designed for fire. The last option was to look at the option to apply braces. There are three variants for the placement of the braces. The first two variants are based on a 'hanging construction' in which a building structure is provided at the top of a building. The third variant was to place braces around an x number of floors. X is the variable of the numbers of floors here.

The analysis of the forces has shown that part B of the 'Maankwartier' can be sustained by a second carrying path via braces, but it is also possible to dimension the structure against fire. In all variants to create robustness, extra reinforcement is required in the beams. Applying reinforcement based on the calamity is the only option that can not be applied within the 'Maankwartier' because of excessive forces.

It can be concluded that the structure can be sustained during a fire by dimensioning against fire or applying braces. Applying braces to an x number of floors seems to be the best applicable option. It is important to remember that robustness is not a standard procedure. Every form of robustness is unique and depends on many different factors. Architects can have different requirements in designs that, for example, do not allow bracing. If the dimensioning against fire indicates large dimensions while the architect wants a slender structure, an alternative braces-based bridging mechanism could be a solution.

Inhoudsopgave

1. Inleiding	1
1.1. Leeswijzer	1
2. Afstudeeronderzoek	3
2.1. Doelen en onderzoeksvragen	3
2.2. Vooronderzoek	3
2.2.1. Informatie verzamelen	3
2.2.2. Literatuurstudie	4
2.2.3. Voorstudie	4
2.2.4. Casus	4
2.3. Hoofdonderzoek	5
3. Conclusies literatuur- en voorstudies	6
3.1. Instortingen	6
3.1.1. Geschiedenis instortingen	6
3.1.2. Categorieën instortingen	7
3.2. Brand	9
3.2.1. Brandfysica	10
3.2.2. Rook en rookontwikkeling	12
3.2.3. Vluchten	13
3.2.4. Constructiegedrag bij brand	13
3.3. Rekenmethoden bij brand	14
3.3.1. Prestatiecriteria en ontwerpprocedure	14
3.3.2. Berekeningsmethoden	15
3.3.3. Belastingen	15
3.4. Regelgeving van constructies in buitengewone situaties	19
3.4.1. Gevolgklassen volgens NEN-EN 1990	19
3.4.2. Aanbevolen ontwerpstrategieën volgens de NEN-EN 1991-1-7	19
3.4.3. Toetsing robuustheid in de praktijk	20
3.4.4. Ontwerpstrategieën	21

4. Uitgangspunten hoofdonderzoek	22
4.1. Constructief ontwerp.....	22
4.1.1. Algemene gegevens van de constructie	22
4.1.2. Stabiliteit.....	22
4.1.3. Dakconstructie	23
4.1.4. Laag 7.....	26
4.1.5. Laag 1 t/m 6	28
4.1.6. Begane grond en fundering	29
4.2. Raamwerkberekening.....	30
4.2.1. Schematisering	30
4.2.2. Permanente belastingen.....	33
4.2.3. Variabele belastingen.....	34
4.2.4. Puntlasten	35
4.2.5. Belastingen	36
4.3. Calamiteitensituaties	38
4.3.1. Calamiteitsituatie 1	38
4.3.2. Calamiteitsituatie 2	40
4.4. Maatregelen ten behoeve van de calamiteit.....	42
4.4.1. Wapenen van de calamiteit.....	42
4.4.2. Dimensioneren op brand	42
4.4.3. Tweede draagweg via schoren	43
5. Hoofdonderzoek.....	49
5.1. Resultaat en analyse uiterste grenstoestand	49
5.2. Hypothese calamiteitensituaties	50
5.2.1. Calamiteitsituatie 1	50
5.2.2. Calamiteitsituatie 2	51
5.3. Resultaten en analyse calamiteitensituaties	52
5.3.1. Calamiteitsituatie 1	52
5.3.2. Calamiteitsituatie 2	54
5.4. Hypothese maatregelen.....	56

5.4.1.	Wapenen van de calamiteit.....	56
5.4.2.	Dimensioneren op brand	56
5.4.3.	Tweede draagweg via schoren	57
5.5.	Resultaten en analyse maatregelen.....	60
5.5.1.	Wapenen van de calamiteit.....	60
5.5.2.	Dimensioneren op brand	61
5.5.3.	Tweede draagweg via schoren	61
5.6.	Vergelijking maatregelen	64
5.6.1.	Krachtswerking.....	64
5.6.2.	Wapening	67
6.	Conclusies en aanbevelingen.....	73
6.1.	Hoofdvraag	73
6.2.	Deelvragen	74
6.3.	Aanbevelingen.....	77
6.3.1.	Vervolgonderzoeken	77

Opgave van de bijlage

Hieronder is een overzicht gegeven van de bijlages die bij het hoofdrapport horen.

Bijlage A:	Plan van aanpak
Bijlage B:	Literatuurstudies
Bijlage C:	Voorstudies
Bijlage D:	Berekeningen
Bijlage E:	Genummerde bronnenlijst
Bijlage F:	Tekenwerk
Bijlage G:	Algemene projectbijlagen

1. Inleiding

Al sinds er gebouwd wordt, zijn er gebouwen ingestort. Ook de afgelopen jaren zijn er bouwwerken geweest waarvan de draagconstructie het op een gegeven moment heeft begeven. Bekende voorbeelden hiervan zijn de Twin Towers, New York in 2001, Ronan point, Londen in 1968 en de Patio Sevilla, Maastricht in 2003. De oorzaken hiervan kunnen sterk uiteenlopen. Een specifieke calamiteit waardoor een gebouw kan instorten is brand. Twee voorbeelden van gebouwen die door brand zijn ingestort zijn de Windsor Tower, Madrid in 2005 en de Faculteit Bouwkunde TU Delft in 2008. Bij openbare gebouwen kan een instorting voor doden en gewonden zorgen. Om instorting te voorkomen is het belangrijk om een constructie robuust te maken. In theorie wordt de constructie in staat geacht om calamiteiten zoals brand op te kunnen vangen. Dit is met de ingang van de Eurocode in 2012 als verplicht gesteld. Het lastige aan de robuustheid is echter dat dit een moeilijk te toetsen begrip is. Wanneer is iets robuust genoeg en hoe is robuustheid aan te brengen in een constructie?

In dit onderzoeksrapport wordt er gezocht naar de mogelijkheden om een constructie via een tweede draagweg robuust te maken. Door de verschillende oplossingen nader te onderzoeken en die resultaten daarvan te analyseren en te vergelijken met de uiterste grenstoestand, kunnen er aanbevelingen gedaan worden voor oplossingen voor calamiteitsituaties.

Er zijn een aantal eisen gesteld aan dit onderzoek. Een eis is dat de dimensies van de constructie gehandhaafd blijven. Het aanbrengen van extra wapening is wel toegestaan. Daarnaast is er gezocht naar een oplossing waarbij de constructie onbeschermd is. Het aanbrengen van coatings of isolatiemateriaal is niet toegestaan.

Eerst is een theoretische studie nodig om het probleem inzichtelijk te maken. De theoretisch kennis die hieruit verworven is toegepast door middel van raamwerkberekeningen die in de uiterste grenstoestand en onder brand getoetst is. Daarna worden de calamiteitsituaties berekend en getoetst, gevolgd door alle voorzieningen om een tweede draagweg te realiseren.

1.1. Leeswijzer

De opbouw van het afstudeerrapport is als volgt. In hoofdstuk 2 wordt het probleem verder uitgewerkt en zullen er onderzoeksvragen geformuleerd worden. In datzelfde hoofdstuk is er ook nog een kort plan van aanpak over hoe het onderzoek uitgewerkt is. Hoofdstuk 3 bevat de conclusies uit de literatuur en voorstudies. De kennis die uit deze studies verkregen, werd gebruikt voor het uiteindelijke hoofdonderzoek. Hoofdstuk 4 bestaat uit de uitgangspunten die benodigd zijn voor het hoofdonderzoek. Dit bevat het constructief ontwerp van de casus, een schematisering van het raamwerk waarbij een tweede draagweg gerealiseerd gaat worden, twee verschillende

calamiteitsituaties en drie verschillende calamiteitsvoorzieningen. In hoofdstuk 5 wordt het hoofdonderzoek beschreven. Het hoofdonderzoek is in drie delen opgesplitst. Als eerste worden de calamiteitsituaties nader onderzocht en verklaard. Ten tweede worden de calamiteitvoorzieningen doorgerekend en geanalyseerd. Als laatste worden alle krachten en wapeningskeuzes van alle situaties met elkaar vergeleken. De verschillen tussen de uitkomsten zullen dan ook verklaard worden. In hoofdstuk 6 worden conclusies getrokken uit het hoofdonderzoek en worden er aanbevelingen gedaan ten behoeve van een tweede draagweg. Ook worden er aanbevelingen gedaan voor vervolgonderzoeken die aansluiten bij dit rapport.

2. Afstudeeronderzoek

2.1. Doelen en onderzoeksvragen

De robuustheid van constructies is voor veel constructeurs nog een grijs gebied. Robuustheid is volgens de Eurocode (NEN-EN 1991-1-7, artikel 1.5.14) het vermogen van een constructie om weerstand te bieden aan gebeurtenissen als brand, ontploffingen, stootbelastingen of de gevolgen van een menselijke fout, zonder te zijn beschadigd in een mate die niet in verhouding staat tot de oorspronkelijke oorzaak. Een constructie is dus robuust als de gevolgen van een schade aan een constructie in verhouding staan tot de oorzaak van die schade. Maar wat houdt robuustheid concreet in? Deze gedachte is de basis waarmee onderzoeksvragen voor dit onderzoek zijn opgesteld. De onderzoeksvraag luidt daarom:

In hoeverre is de constructie van gebouw B van het Maankwartier te Heerlen via een tweede draagweg draagkrachtig te houden in een buitengewone situatie zoals brand?

Om deze vraag goed te kunnen beantwoorden zijn de volgende deelvragen opgesteld:

1. Welke eerdere gevallen van ingestorte gebouwen zijn bekend en welke type instortingen zijn er?
2. Wat zijn de brandveiligheidseisen van gebouw B?
3. Wat is de huidige wetgeving op het gebied van constructies bij brand?
4. Welke opties zijn er ten aanzien van een tweede draagweg in een gebouw en wat zijn de alternatieven?
5. Wat is de impact van het wegvallen van een constructief element zoals een kolom?
6. Wat is de reststerkte van een constructie na een incident zoals brand?

Deze vragen zijn opgesteld aan het begin van het onderzoek. Vanwege een splitsing in de eindopdracht is het niet mogelijk om alle vooraf opgesteld deelvragen te beantwoorden. Deelvraag 1 en 6 zijn in het vooronderzoek behandeld en valt daarmee nog binnen de samenwerking. De vragen 3, 4 en 5 zijn na de splitsing uitgevoerd. Voor een goed eindresultaat wordt het onderzoek gesplitst in twee verschillende fasen: het vooronderzoek en het hoofdonderzoek.

2.2. Vooronderzoek

2.2.1. Informatie verzamelen

Informatie is essentieel in het vormen van een beter beeld over de onderwerpen 'tweede draagweg', maar ook over brand. Hierbij werd er in de bibliotheek literatuur gezocht die relevantie hebben tot dit onderwerp. Daarnaast is er ook gezocht naar voorbeeld rapporten van oud-afstudeerders. Deze zijn gezocht via Xplora en de HBO-kennisbank. Het raadplegen van artikelen uit vaktijdschriften zoals Cement en Bouwen met staal leggen voor het voor- en

literatuuronderzoek een goede basis. Als laatste worden ook alle relevante (Eurocode) normen verzameld.

2.2.2. Literatuurstudie

De literatuurstudie is een onderdeel uit de voorstudie. De verzamelde informatie zoals boeken en artikelen worden hier uitgewerkt. Dit heeft als doel om inzicht te krijgen in onderwerp. Om het literatuuronderzoek overzichtelijk te houden, is deze opgesplitst in 3 stukken:

1. Literatuurstudie naar instortingen: onderzoek naar de geschiedenis van instortingen en op welke manieren gebouwen kunnen instorten.
2. Literatuurstudie naar brand: dit onderzoek geeft meer inzicht over de definitie van brand en wat de gevolgen zijn zoals: rook, vluchtende mensen maar ook het gedrag van draagconstructies op brand.
3. Literatuurstudie naar rekenmethoden bij brand: studie naar welke methoden toepasbaar zijn op brandberekeningen.

Deze literatuurstudies zijn opgenomen in bijlage B.

2.2.3. Voorstudie

In de voorstudie is er onderzoek gedaan naar de eisen voor de robuustheid van constructies. Er is specifiek gekeken naar gevolgklassen, eisen bij buitengewone situaties en ontwerpstrategieën volgens de Eurocode. Deze is eerst door Monica Suijs gemaakt en daarna is deze door mijzelf aangevuld.

2.2.4. Casus

In overleg met Avans Hogeschool en Volantis is besloten om de kennis uit het onderzoek toe te passen op een bestaande casus. Er waren een aantal voorkeuren voor de casus van deze afstudeeropdracht, namelijk:

- Hoogbouw
- Veel personen aanwezig in het gebouw
- Personen die het gebouw nog niet goed kennen.

Een logiesfunctie heeft in deze de voorkeur en er is in samenwerking met Volantis een project met een hotel



Figuur 2.1, het Maanhotel te Heerlen. Overgenomen uit "Opdrachtgever: Maanhotel Heerlen wordt gewoon gebouwd", 2017 (https://www.limburger.nl/cnt/dmf20170710_00043208/opdrachtgever-maanhotel-heerlen-wordt-gewoon-gebouwd). Copyright 2018, Media Groep Limburg

uitgezocht. Het project dat bij dit onderzoek zal worden gebruikt is het Maankwartier te Heerlen. Het Maankwartier is een groot project waardoor er een deel van het complex gekozen is om uit te gaan werken. Dit deel is gebouw B, het Maanhotel (figuur 2.1).

Het hotel ligt aan de zuidkant van het spoor en het station van Heerlen. Het hotel heeft 8 verdiepingen en 2 kelderlagen voor parkeren. Verder zitten er een restaurant, een keuken, bijeenkomstruimtes en hotelkamers in het hotel.

De 2 kelderlagen zijn niet meegenomen in het onderzoek, omdat hier andere brandveiligheidseisen gelden dan voor het hotel. De fundering is in dit geval de begane grond vloer, hieronder zit de kelder die niet meegenomen wordt vanwege het feit dat deze een groter onderdeel is van het complex. De constructieve opbouw en de stabiliteit van het gebouw wordt aangepast en vereenvoudigd. De uitwerking hiervan is te vinden in het hoofdstuk Constructief ontwerp.

De indeling door de architect kan aangepast worden. De keuken kan bijvoorbeeld opgeschoven worden als dat voor de constructie ongunstiger uitkomt. Wanneer de brandhaard op de ongunstigste plek aanwezig is, is er een maatgevende situatie voor het onderzoek. In het onderzoek wordt alleen deze plek gebruikt voor de berekeningen tegen brand en ten behoeve van de tweede draagweg. Het vereenvoudigen van de casus wordt uitgewerkt in hoofdstuk 4: 'Uitgangspunten hoofdonderzoek' en in bijlage D.

2.3. Hoofdonderzoek

De casus van het Maankwartier dient als basis voor het hoofdonderzoek naar een tweede draagweg. De structuur van de constructie is vanwege de complexiteit van het gebouw vereenvoudigd. Uit het vernieuwde constructief ontwerp is een 2d-raamwerk gehaald. Voor dat raamwerk worden de belastingen en belastingcombinaties bepaald. De constructie wordt eerst uitgerekend in de uiterste grenstoestand. Hier moet een gebouw standaard aan voldoen volgens de Eurocode.

Daarna zijn de calamiteitensituaties berekend. Deze worden vooraf bepaald. Er is gekozen voor twee calamiteitensituaties, zo is er een vergelijking gemaakt tussen deze twee calamiteitensituaties en kan er meer gezegd worden over het rest-raamwerk dan wanneer er één specifieke kolom bezwijkt. Deze twee calamiteitensituaties zijn beide doorgerekend in het raamwerkprogramma van Technosoft. De resultaten daarvan worden geanalyseerd. Als het duidelijk wordt waar die uitvoer uit het programma vandaan komt kan er beter gekeken worden naar wat een effectieve oplossing zou kunnen zijn voor een tweede draagweg. Na deze stap zijn de maatregelen doorgerekend en geanalyseerd. Voor deze uitvoer is een analyse gemaakt.

In de laatste stap zijn alle krachten en wapeningskeuzes met elkaar vergeleken. Hieruit zijn conclusies getrokken en aanbevelingen gemaakt ten behoeve van een tweede draagweg.

3. Conclusies literatuur- en voorstudies

3.1. Instortingen

3.1.1. Geschiedenis instortingen

De literatuurstudie over dit onderwerp is te vinden in bijlage B01. Dit hoofdstuk (3.1.1. Geschiedenis instortingen) over de geschiedenis van instortingen is gemaakt door Monica Suijs en is alleen ter raadpleging gebruikt.

Alle instortingen in deze studie hebben een andere oorzaak, maar toch zijn er gelijkenissen te vinden in de soorten oorzaken voor instortingen benoemd in paragraaf 1.1. van de literatuurstudie over instortingen.

De oorzaken van instortingen kunnen zijn: ouderdom, natuurlijke oorzaken, menselijk ingrijpen, technisch falen of constructieve fouten. Door een kleine literatuurstudie te doen naar de selectie bekende en interessante instortingen kunnen gelijkenissen worden gevonden en conclusies worden getrokken.

In de studie zit één gebouw dat door ouderdom zou kunnen zijn ingestort. Het hoekpand van de Pearle was een eeuwenoud pand uit de 15^e eeuw, wat ook al een aantal verbouwingen had ondergaan. Toch is ouderdom niet de oorzaak geweest. De oorzaak was een constructieve fout.

Verder waren er ook geen gebouwen die zijn ingestort door natuurlijke oorzaken. Het Hartford Civic Center Arena is ingestort door sneeuw op het dak. Dit kwam door een ontwerpfout. De sneeuwlaag op het dak was namelijk niet abnormaal groot.

Het Murrah Federal Building is het enige gebouw in de lijst die door een bomexplosie is ingestort. De Twin Towers zijn de enige twee torens die inslagen van vliegtuigen hebben gehad. De torens zijn hierdoor echter niet ingestort. De inslag van de vliegtuigen veroorzaakte wel een explosie en een brand die de uiteindelijke oorzaak waren voor het instorten. Beide gebouwen hebben dus het menselijke ingrijpen als oorzaak voor het instorten.

Er zijn drie gebouwen, binnen dit afstudeeronderzoek, die door een technisch falen zijn ingestort. Ronan Point in Londen is door een gasexplosie deels ingestort. Windsor Tower in Madrid is door brand deels ingestort nadat er kortsluiting was ontstaan in een kantoorkamer. De Bouwkunde Faculteit TU Delft is ook door brand deels ingestort nadat hier kortsluiting was ontstaan bij het koffiezetapparaat.

De meeste instortingen uit de voorstudie komen door constructieve fouten. Het Hartford Civic Center Arena is ingestort door sneeuw. Maar de constructie was ook al verkeerd ontworpen, en er

waren verkeerde belastingen voor sneeuw aangehouden, waardoor het dak de gewone laag sneeuw al niet aankon.

De loopbrug van het Hyatt Regency Hotel was ingestort door een verkeerde verbinding in de constructie. Dit was dus een ontwerpfout. De Sampoong Department Store was ingestort door meerdere constructieve fouten. De aannemer had onder druk van de opdrachtgever en architect een extra verdieping gebouwd en bepaalde onderdelen van de constructie slanker uitgevoerd dan mogelijk was. De balkons van het Patio Sevilla zijn ingestort door een constructieve fout bij de oplegging van de stalen kolom. Dit is waarschijnlijk een ontwerpfout geweest.

Het Rana Plaza was ingestort door meerdere constructieve fouten. Ook hier had de aannemer onder druk van de opdrachtgever meerdere verdiepingen gebouwd. Ook zijn er verkeerde belastingen voor de verdiepingen aangehouden.

Het hoekpand van de Pearle in 's-Hertogenbosch was ingestort door een constructieve fout in de kelder. Hier was bij een eerdere verbouwing een verkeerde constructie toegevoegd.

Het MPB van Eindhoven Airport is ingestort door een constructieve fout in de vloer.

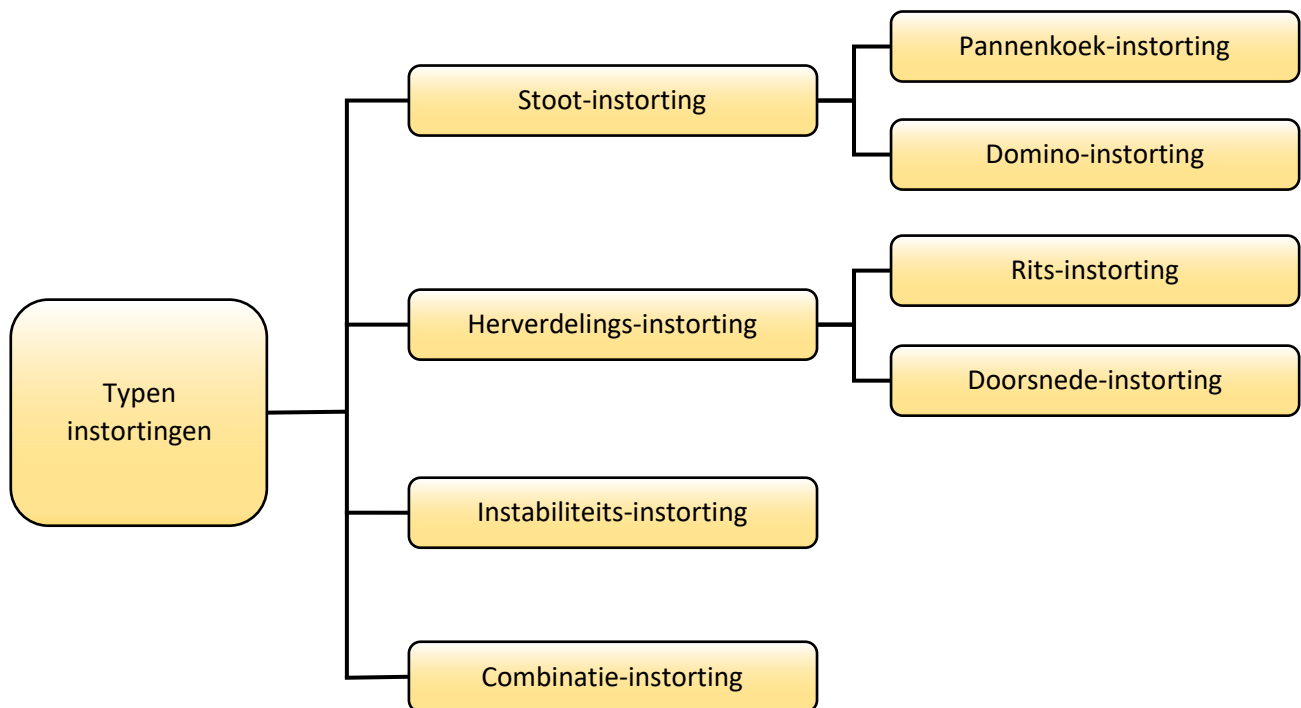
Uit de deelvraag 'Welke eerdere gevallen van instortingen zijn bekend en wat was de oorzaak?' blijkt dat er in de geschiedenis meerdere gebouwen zijn ingestort. Er is dus een selectie gemaakt van bekende en interessante instortingen. Er is verder onderzoek gedaan naar wat de oorzaken zijn voor deze instortingen. Er zijn meerdere oorzaken mogelijk voor het instorten van gebouwen.

Opvallend is dat er maar weinig gebouwen (bekend) zijn die door brand zijn ingestort of deels ingestort. De gebouwen die door brand zijn ingestort, zijn alleen deels ingestort. De brand is in de bekende gevallen veroorzaakt door technisch falen. Een goede tweede draagweg ontbrak bij deze gebouwen.

De meeste gebouwen zijn ingestort door een aaneenschakeling van fouten. Door een van deze fouten weg te nemen, zoals het toevoegen van een tweede draagweg, wordt de kans op instorting verkleind. Het zorgt ervoor dat een gebouw langer kan blijven staan zodat alle personen veilig uit het gebouw kunnen komen. Hierdoor kan een groot aantal slachtoffers worden voorkomen. Het kan ook zijn dat een gebouw niet instort of dat de schade beperkt blijft op het moment dat er een aanzienlijk deel van de constructie is bezweken. Uit dit literatuuronderzoek blijkt dat de tweede draagweg een belangrijke rol kan spelen bij de veiligheid van een gebouw.

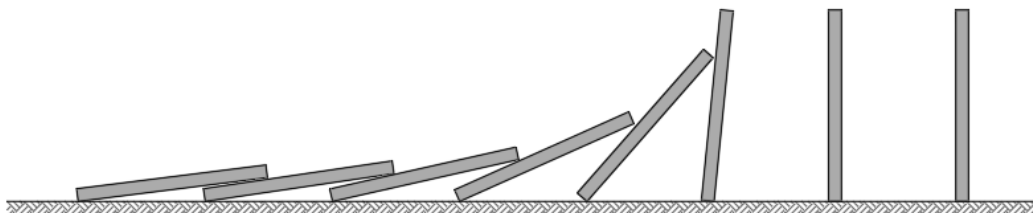
3.1.2. Categorieën instortingen

De wijze waarop gebouwen, zoals hierboven beschreven, kunnen instorten, is in te delen in verschillende categorieën. Ze zijn op te delen in vier hoofdcategorieën waarbij twee hoofdcategorieën in te delen zijn in twee subcategorieën (zie figuur 3.1). Deze worden allemaal besproken in de literatuur van Starossek (Bolle, 2009; De Boer, 2012; Van Dijk, 2011).



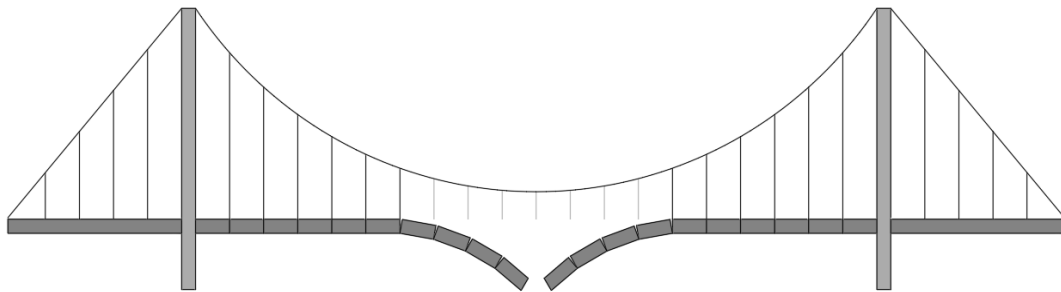
Figuur 3.1, schema van typen instortingen

Het eerste type instorting is de zogenaamde stoot-instorting. Bij een stoot-instorting is er sprake van overmatige belasting op een constructieonderdeel in een korte tijd (De Boer, 2012). Dit komt vaak door vallende of tegen andere constructie-elementen aan kantelende elementen. Vaak is de constructie niet berekend op een dergelijke impulsieve kracht, waardoor de constructie kan instorten. De stoot-instorting is in te delen in twee typen, namelijk: pannenkoek- en domino-instorting. De pannenkoek-instorting is een domino-instorting in de verticale richting, een voorbeeld hiervan is de instorting van het World Trade Centre te New York in 2001. Een domino-instorting is een instorting in horizontale richting. Het principe werkt hetzelfde als dominosteentjes die elkaar laten omvallen (zie figuur 3.2).



Figuur 3.2, domino-instorting

De tweede categorie van typen instortingen is de herverdelings-instorting. De naam herverdelings-instorting staat voor het feit dat, zodra er een constructief element wegvalt, er belasting moet worden herverdeeld. Als er bijvoorbeeld een kolom wegvalt zal de belasting die de kolom tot zich nam, bijvoorbeeld de vloerbelasting, over de resterende constructie worden verdeeld. Herverdeling leidt tot grotere krachtswerking over de resterende constructie. Instorting kan het gevolg zijn. Op gebouwniveau wordt dat een rits-instorting genoemd (De Boer, 2012). De vorm van een rits is goed te zien in figuur 3.3. Bij deze hangbrug zijn de hangers bezwaken, hierdoor moet het wegdek op een andere manier opgevangen worden. Nu er een aantal wegdekken zijn bezwaken is de vorm van een rits goed te zien. In de literatuurstudie in bijlage B01 is dit voorbeeld in stappen uitgelegd.



Figuur 3.3, rits-instorting

Op elementniveau wordt een herverdelings-instorting een doorsnede-instorting genoemd. Dit wordt verder in de literatuur weinig beschreven (De Boer, 2012; Van Dijk, 2011).

De laatste op-zich-zelf-staande instorting is de instabiliteits-instorting. In een constructie kunnen er voorzieningen worden getroffen om het gebouw stabiel te houden. Wanneer deze wegvallen wordt de constructie of een element instabiel. Instabiliteit kan tot een instorting leiden. Dat betekent niet dat dit altijd tot een instorting leidt.

Er is echter zelden een instorting die zuiver in te delen valt in een van deze typen instortingen. Er worden vaak meerdere vormen van instortingen gecombineerd (Van Dijk, 2011). Dit heet een combinatie-instorting.

3.2. Brand

De literatuurstudie naar de geschiedenis van instortingen laat zien dat brand een oorzaak kan zijn. In de volgende literatuurstudie wordt voornamelijk het fysische aspect van brand bekeken en wat voor invloed een brand op de draagconstructie kan hebben. Ook de effecten van rook en vluchtgedrag wordt nader bekeken. De volledige literatuurstudie is terug te vinden in bijlage B02.

3.2.1. Brandfysica

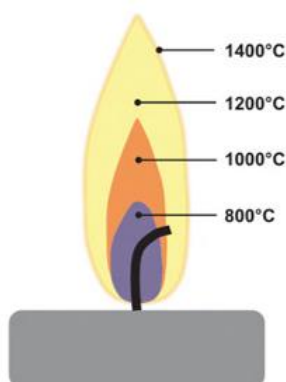
Het belangrijkste voor een verbranding is dat er zuurstof, brandstof en warmte aanwezig is (Tromp & Van Mierlo, 2014, p. 45). Dit heet de branddriehoek (figuur 3.4). Wanneer er een van die drie ontbreekt zal er geen verbranding plaatsvinden. Het is dus van belang om deze drie aspecten niet bij elkaar te laten komen. Ook is de verhouding tussen brandstof en zuurstof erg belangrijk.

Wanneer deze 50-50% is wordt er gesproken over een stoichiometrische verhouding. Bij deze verhouding is de verbranding optimaal. Dit is alleen mogelijk bij een gecontroleerde verbranding. Indien de verhouding tussen zuurstof en brandstof te ver afwijkt van de stoichiometrische verhouding, zal er geen verbranding plaatsvinden (Tromp & Van Mierlo, 2014, p. 46). Wanneer er wel brand ontstaat zal er warmteoverdracht plaatsvinden. Dit kan via geleiding (via vaste stoffen), convectie (via bewegende materie) en straling (zonder tussenkomst van materie, dus bijvoorbeeld via licht).

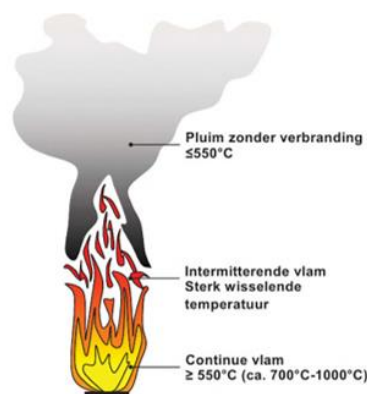


Figuur 3.4, branddriehoek

Het zichtbare deel van een verbranding is de vlam (Tromp & Van Mierlo, 2014, p. 48). De kleur van de vlam wordt bepaald door de energietoestand van de elektronen. De (zichtbare) straling die daarbij vrijkomt is per stof afhankelijk. Bij vlammen zijn er verschillende soorten vlammen. Zo is er een laminaire diffusievlam. Deze is te vergelijken met een kaars. Zuurstof wordt van buitenaf in de vlam opgenomen. Echter gebeurt dit aan de buitenkant van de vlam. Hierdoor is het binnenin de vlam relatief het rijkst aan brandstof. Daardoor is de verhouding zuurstof-brandstof niet optimaal en is de temperatuur lager. Bij een turbulente diffusievlam wordt er ook zuurstof van buitenaf in de vlam opgenomen. Echter kan deze zuurstof ook weer uit de vlam geduwd worden. Het laatste



Figuur 3.5, laminaire diffusievlam. Overgenomen uit "Fire Safety Engineering" (p. 48) door A.J. Tromp en R.J.M. Van Mierlo, 2013, Delft: Eburon. Copyright 2014, Uitgeverij Eburon



Figuur 3.6, turbulente diffusievlam. Overgenomen uit "Fire Safety Engineering" (p. 48) door A.J. Tromp en R.J.M. Van Mierlo, 2013, Delft: Eburon. Copyright 2014, Uitgeverij Eburon

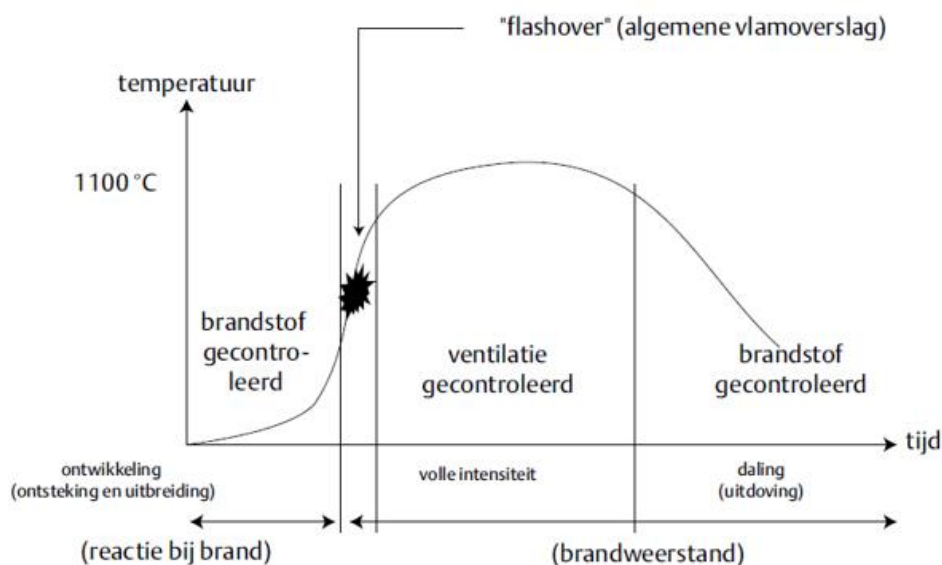
type vlam is een voorgemengde vlam. Deze is aangepast aan de stoichiometrisch verhouding waardoor een goede verbranding ontstaat. Denk bijvoorbeeld aan een gasfornuis.

	Kenmerken
Diffusievlam • Laminaire diffusievlam • Turbulente diffusievlam	Lucht mengt zich vanaf de buitenkant met de vlam • Stabiele toevoer van zuurstof aan de buitenkant van de vlam • Toestroom van lucht is instabiel, zuurstof wordt de vlam in getrokken maar kan er ook snel uitgeduwd worden
Voorgemengde vlam	Zuurstof is gemengd met de verbrandingsgassen al voor de ontsteking

Tabel 3.1, overzicht met typen vlammen

Elke brandstof heeft een eigen ontbrandingstemperatuur. Hierdoor kunnen stoffen ontbranden zodra de temperatuur boven de ontbrandingstemperatuur komt. Daarnaast kunnen factoren zoals wind een rol spelen. Als de wind een brand tegen een object aanblaast, kan de ontbrandingstemperatuur van dat object behaald worden.

De ontbrandingstemperatuur speelt een enorm belangrijke rol bij de ontwikkeling van brand. Wanneer de temperatuur tijdens een binnenbrand wordt uitgezet tegenover de tijd (figuur 3.7), dan is te zien dat de temperatuur binnen de perken blijft. Dit komt omdat de brand tot dat moment alleen bij de ontstekingsbron aanwezig is. Wanneer de temperatuur de ontbrandingstemperatuur van de omliggende objecten heeft bereikt, zullen deze ontbranden. Dit heet de 'flash-over'.



Figuur 3.7, schematische weergave temperatuurverloop van een binnenbrand. Overgenomen uit "Beton en brand" door J.F. Denoël, 2006, "Cement 7" (p. 31). Copyright 2013, Aeneas Media

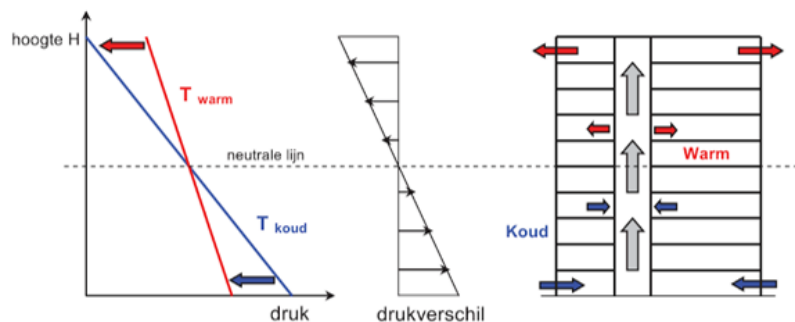
Wanneer de flash-over plaatsvindt is er geen mogelijkheid meer om te vluchten vanwege de omvang van de brand. Binnen de ruimte is al het brandbaar materiaal aan het branden. Na 80% van de verbranding zal de dooffase beginnen. De brand vermindert in kracht vanwege de afname in brandbaar materiaal.

In de norm is een standaardbrandkromme opgesteld. Dit beschrijft het veronderstelde verloop van de temperatuur in de tijd (Hamerlinck, 2010, p. 1.18). Deze kunnen inzicht geven in onder andere de thermische belasting. Dit is dan voornamelijk voor materiaalgedrag en constructiegedrag. Er zijn in de Eurocode norm vier brandkrommen opgenomen: de standaardbrandkromme, gereduceerde brandkromme, koolwaterbrandkromme en de tunnelbrandkromme. De standaardbrandkromme is voor 'normale' gebouwen het meest gebruikelijk.

3.2.2. Rook en rookontwikkeling

Rook zorgt voor de meeste slachtoffers tijdens een brand (Hamerlinck, 2010, p. 1.4). Rook is het totale volume waarin zich lucht en zwevende vaste, vloeibare en gasvormige verbrandingsproducten zitten. Die verbrandingsproducten kunnen giftig zijn. Zo bevat rook het giftige koolstofmono-oxide. Wanneer er te veel van dit gas wordt ingeademd, zal er geen zuurstof meer in het lichaam aanwezig zijn wat zorgt voor overlijden. Het gevaar van rook zit naast de toxiciteit van de stoffen ook in de belemmering van het zicht. Wanneer er weinig zicht is door rook wordt vluchten lastig.

Belangrijk is dat in een gebouw meerdere factoren de stroming van rook kunnen beïnvloeden. Zo zal rook door verschillen in de dichtheid zo ver mogelijk naar boven gaan. Hierdoor ontstaat er een rooklaag. Er zal daarbij een duidelijk horizontaal scheidingsvlak ontstaan, onder dit scheidingsvlak bevindt zich koude omgevingslucht. Dit heet stratificatie. Uiteindelijk treedt volledige menging op tussen rook en omgevingslucht.



Figuur 3.8, schematische weergave schoorsteeneffect en bijbehorende luchtstromingen in een gebouw. Overgenomen uit "Fire Safety Engineering" (p. 71) door A.J. Tromp en R.J.M. Van Mierlo, 2013, Delft: Eburon. Copyright 2014, Uitgeverij Eburon

Ook kan er een 'schoorsteen' effect ontstaan. Dit is schematisch weergegeven in figuur 3.8. Zoals

bekend is de dichtheid van warme lucht op grotere hoogte groter dan koude lucht (Tromp & Van Mierlo, 2014, p. 71). Op een laag niveau is dit omgedraaid. Hierdoor stijgt warme lucht op. Wanneer er in een gebouw de ruimte is voor de rook om op te stijgen (aula's, schachten) ontstaat er een stroming. Hierdoor zal de rook zich naar boven verspreiden over het gebouw.

Ook is de winddruk die tegen het gebouw aan staat erg van belang. De wind kan de stroming van rook beïnvloeden. Ook als de wind alleen buiten het gebouw blijft. Het feit dat rook warm wordt, zorgt ervoor dat het volume toeneemt. Hierdoor ontstaat er als het ware 'extra' lucht. Wanneer dat in een ruimte gebeurt zal de druk in die ruimte toenemen aangezien de ruimte zelf niet groter kan worden. Dit heet expansie. Als laatste kunnen installaties invloed uitoefenen op de stroming van rook. Zo zal een mechanische ventilatie rook kunnen sturen.

Vanuit menselijk oogpunt is het beste om geen rook in te ademen. Rook bevat dus giftige gassen, maar er is ook minder zuurstof aanwezig (Tromp & Van Mierlo, 2014, p. 84). Hierdoor wordt vluchten uit de ruimte bemoeilijkt. Het is ook benoemingswaardig om te zeggen dat het effect van rook op mensen per persoon verschilt. De een reageert anders op een bepaalde stof dan een ander persoon. Dat maakt het lastig om de toxische gevolgen van rook goed in te schatten. Het is sowieso lastig om rook in zijn algemeenheid te bepalen. Elke situatie is weer anders en er zijn heel veel factoren die rook beïnvloeden. Er is software beschikbaar waarmee brand- en rookontwikkeling te berekenen zijn. Zo zijn er op de markt CFD (Computational Fluid Dynamics) programma's beschikbaar. Deze zijn echter zo specialistisch dat er bijna geen CFD-modellen worden gemaakt, en wanneer deze worden gemaakt gebeurt dat door een externe partij die daarin gespecialiseerd is.

Een manier die meer voor de hand ligt is een zone-model. Het belangrijkste is dat deze vorm van modellering maar per zone of per twee zones gaat. Hierdoor wordt de software minder uitgebreid dan CFD. Uit een zone-model kan de dikte, temperatuur van en het zicht in de rooklaag berekend worden (Tromp & Van Mierlo, 2014, p. 261).

3.2.3. Vluchten

Volgens het Bouwbesluit 2012 moeten er in elk gebouw de dusdanige voorzieningen aanwezig zijn dat het ontluchten van het gebouw goed kan verlopen (Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties, 2018). Hiervoor zijn vluchtwegen bedacht. Het grootste probleem tijdens vluchten is echter de reactietijd van mensen. Mensen nemen brandalarmen vaak niet serieus en denken vaak nog even wat mee te kunnen nemen. Daarnaast hangt vluchten ook af van de doorstroomcapaciteit, reactietijd en de loopsnelheid. Ook dit verschilt van persoon tot persoon.

3.2.4. Constructiegedrag bij brand

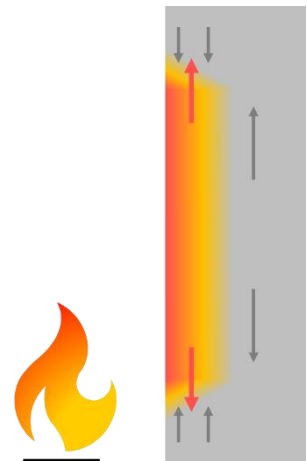
Onder constructiegedrag wordt in dit onderzoek specifiek gekeken naar draagconstructies. In de literatuurstudie wordt er gekeken naar staal en beton.

Staal is een geleidend materiaal. Wanneer staal opwarmt zal er over het gehele element dezelfde temperatuur zijn. Het belangrijkste aandachtspunt van staal bij brand is de temperatuur die de brand bereikt. Wanneer de temperatuur te hoog wordt, zal de sterkte en de stijfheid van het staal afnemen (Hamerlinck, 2010, p. 1.28). Dit gebeurt bij ongeveer 400°C. Hierdoor gaat zal eerder

plastisch vervormen dan in een niet brandende situatie. Dit heeft als nadeel dat er blijvende vervormingen kunnen ontstaan. Aan de terugnemende sterkte van staal hangt een kritieke staaltemperatuur. Deze temperatuur bepaalt tot welke temperatuur de constructie blijft staan. Om bezwijken te voorkomen kan er aan de hand van de kritieke staaltemperatuur overgedimensioneerd worden. Zo kan de constructie meer belasting aan. Ook kan staal worden bekleed met brandwerende coatings of isolatiemateriaal. Verder zijn het maken van hybride constructies (staalbeton) of het vullen met water goede oplossingen (Hamerlinck, 2010, p. 1.10).

Beton is een isolator. Opwarming zal plaatselijk zijn. Hierdoor kunnen er binnenin een betondoorsnede scheuren ontstaan. Dit is na afloop van een brand moeilijk vast te stellen. Een ander punt van aandacht is dat beton een poreus materiaal is en daardoor kan spatten. De druk van het water in de poriën kan heel erg hoog oplopen. Hierdoor spat beton van het element af en kan wapening bloot komen te liggen.

Na een brand zal wapening gaan vloeien, wat betekent dat er forse vervormingen ontstaan. Verder zijn er bij temperaturen van 400°C chemische processen afgebroken waardoor reparatie of vervanging nodig is (Tromp & Van Mierlo, 2014, p. 111). Maatregelen tegen brand zijn het toepassen van grotere dekkingen toepassen en het brandwerend bekleden van de constructie.



Figuur 3.9, temperatuur- en spanningsverdeling in beton bij blootstelling aan brand

3.3. Rekenmethoden bij brand

In deze literatuurstudie is er voornamelijk gekeken hoe er ontwerptechnisch met brand omgegaan moet worden. Er wordt gekeken naar hoe de constructie tegen brand berekend kan worden en wat er allemaal bij komt kijken. De volledige literatuurstudie is te vinden in bijlage B03.

3.3.1. Prestatiecriteria en ontwerpprocedure

Tegenwoordig is het mogelijk om de impact van een brand veel beter in kaart te brengen dan vroeger (Taerwe, 2006). Door de ontwikkeling van onder andere eindige-elementen-pakketten kan van tevoren een constructie ontworpen worden met een aanvaardbare kans op falen. Mede door deze ontwikkelingen zijn er criteria en ontwerpprocedures opgesteld. In de criteria wordt vaak onderscheid gemaakt tussen de volgende aspecten:

- Wanneer een constructie tijdens een brand een dragende functie heeft, dan moet deze constructie erop ontworpen zijn dat deze tijdens een brand overeind kan blijven staan (criterium R).
- Wanneer er sprake is van compartimentering moet de scheidingsconstructie zo ontworpen zijn dat brand niet tot het falen van de integriteit van de scheidingsconstructie leidt door bijvoorbeeld scheurvorming, gaten etc. (criterium E).

- De scheidingsconstructie mag bij compartimentering ook geen isolerende werking verliezen. Anders zou de temperatuur in de niet-blootgesteld zijde kunnen oplopen tot de ontbrandingstemperatuur (criterium I).

Een element kan aan bijvoorbeeld alle drie de criteria voldoen, zoals een scheidende dragende wand. Wanneer er dan een eis gesteld wordt van REI 30 wordt het element ontworpen op een situatie waarbij het element 30 minuten zijn draagfunctie en scheidende functie behoudt.

De ontwerpprocedure van constructies is opgenomen in de Eurocode. In de NEN-EN 1991-1-2 artikel 2.1 staat:

- Keuze van een ontwerpbrandscenario
- Bepaling van bijbehorende ontwerpbranden
- Berekening van een temperatuurontwikkeling binnen een constructie-element
- Berekening van het mechanisch gedrag van de constructie die blootgesteld is aan brand

Deze ontwerpprocedure geldt alleen voor één brandcompartiment.

3.3.2. Berekeningsmethoden

De berekeningsmethoden tijdens brand hebben alleen toepassing op criterium R. Deze gaat alleen over de draagconstructie. Hieronder zijn een aantal methoden gegeven die ook in de Eurocode opgenomen zijn:

1. *Tabellen met minimum afmetingen en wapeningsafstanden.* Vooral bedoeld voor de ontwerpfase. Wanneer er brandveiligheidseisen bekend zijn, kan er aan de hand van randvoorwaarden een minimumafmeting en minimum wapeningsafstand bepaald worden.
2. *Vereenvoudigde berekeningsmethoden.* Binnen deze methoden zijn weer drie verschillende manieren mogelijk. De meest voorkomende is een doorsnede-berekening waarbij een door temperatuur gereduceerde doorsnede getoetst wordt. Dit is de zogenaamde 500°C-isothermmethode. De 500°C-isothermmethode wordt in de literatuurstudie verder uitgelegd.
3. *Geavanceerde berekeningsmethoden.* Voor de toepassing van geavanceerde berekeningsmethoden is een uitgebreid rekenpakket vereist. Deze kunnen in detail een thermische analyse van de constructie maken. Achtergrondkennis is hierbij wel vereist. Vanwege dit feit en de kosten wordt er zelden een beroep gedaan op deze methode.

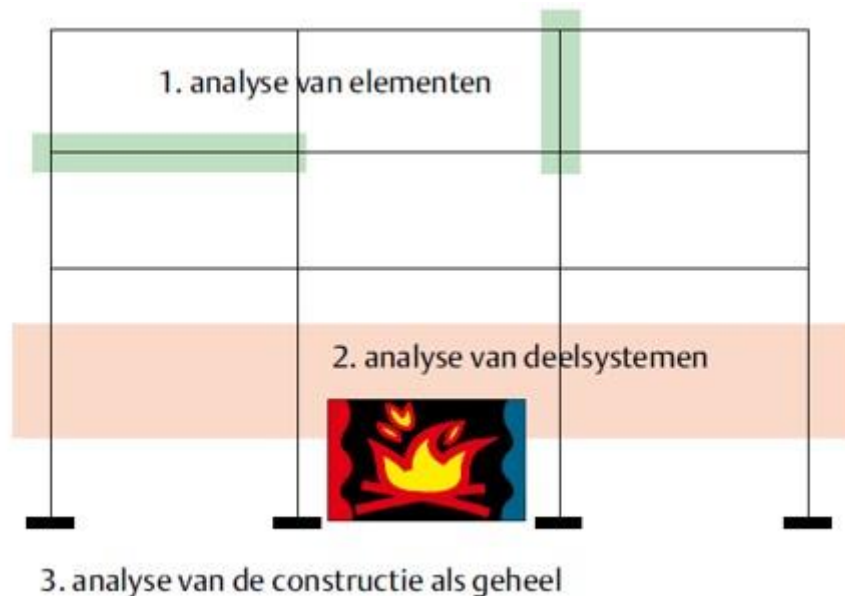
De nummers voor de berekening geven in figuur 3.10 aan op welke schaal de constructie met de methoden berekend kan worden. Voor een overzicht in een tabel kan de NEN-EN 1992-1-2 tabel 0.1.

3.3.3. Belastingen

Voor de belastingen tijdens brand wordt er een onderscheid gemaakt tussen mechanische/statische belasting en thermische belasting.

- **Mechanische/statische belasting**

De mechanische belasting is in een 'normale' situatie ook aanwezig. Dit is niets meer dan de krachten die altijd aanwezig zijn. De karakteristieke belastingen bij brand zijn hetzelfde als

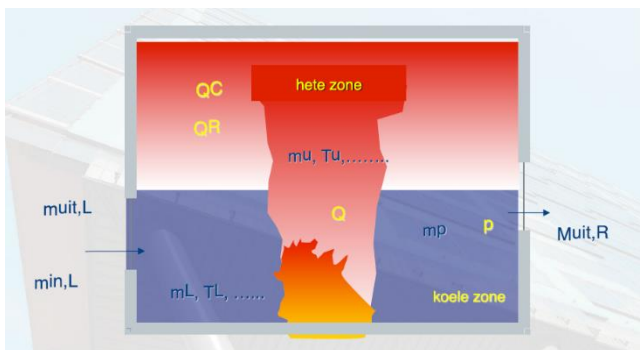


Figuur 3.10, analyse van elementen, deelsystemen of van constructie als geheel.
Overgenomen uit "Brandwerendheid van betonconstructies volgens de Eurocodes" door L. Taerwe, 2006, "Cement 7" (p. 38), Copyright 2006, Aeneas Media

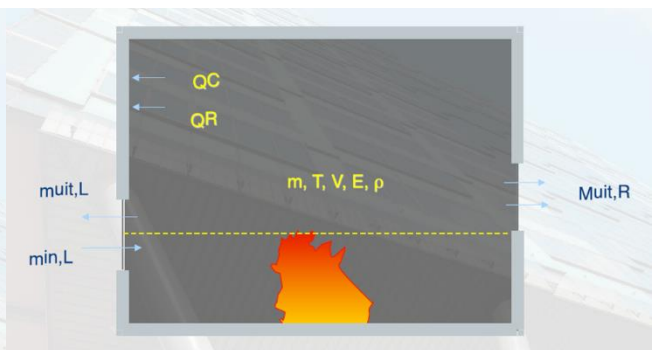
normaal. Het verschil wordt gemaakt in de belastingcombinaties. De belastingcombinatie die tijdens brand gebruikt moet worden is een buitengewone combinatie. Deze luidt als volgt:

$$E_d = G_K + A_d + \psi_2 \times Q_K \quad (6.11b)$$

In deze belastingcombinatie wordt de blijvende belasting niet vermenigvuldigd met een veiligheidsfactor, wat in de uiterste grenstoestand wel zo is. De variabele belasting wordt met de ψ_2 -factor vermenigvuldigd. Daardoor wordt de belasting op de constructie een reële inschatting van wat er daadwerkelijk op de constructie staat tijdens een brand. De belasting van A_d is gebaseerd op krachten die ontstaan vanwege de verhindering van uitzetten. In de literatuurstudie naar brand wordt namelijk beschreven dat materialen ten gevolge van brand en hitte uitzetten.



Figuur 3.11, twee-zone model, Overgenomen uit "FSE van constructies in praktisch perspectief" door A.F. Hamerlinck, 2009 (<http://www.brandveiligmetstaal.nl/upload/file/r%20hamerlinck%20fse%20perspectief%20en%20praktijk.pdf>). Copyright 2009, Bouwen met Staal



Figuur 3.12, één-zone model, Overgenomen uit "FSE van constructies in praktisch perspectief" door A.F. Hamerlinck, 2009 (<http://www.brandveiligmetstaal.nl/upload/file/r%20hamerlinck%20fse%20perspectief%20en%20praktijk.pdf>). Copyright 2009, Bouwen met Staal

De uitzetting kan voor interne spanningen zorgen. In de volgende uitzonderingen mag het effect van A_d verwaarloosd worden:

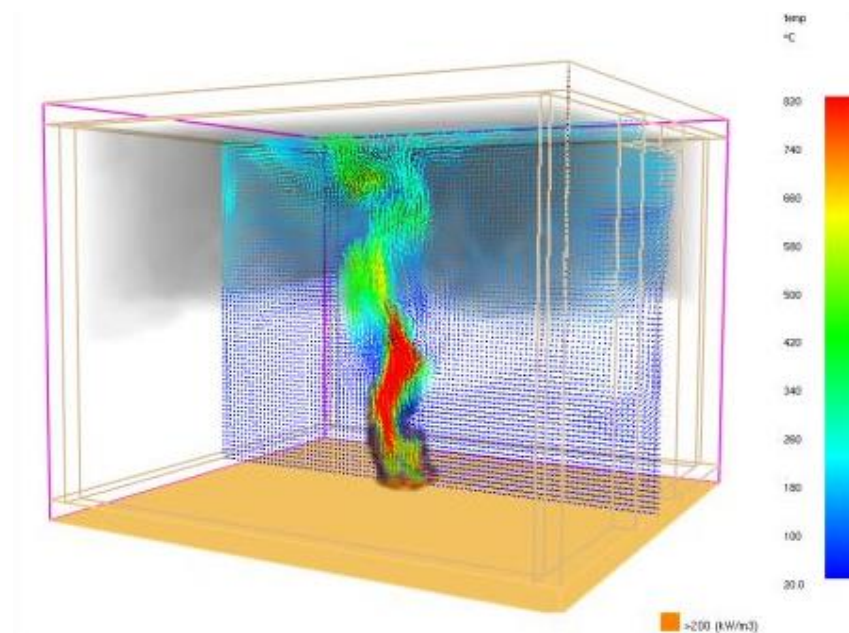
- Als vooraf kan worden aangenomen dat zij een verwaarloosbaar of gunstig effect hebben
- Er al rekening is gehouden door de opleggingen conservatief te schematisering en randvoorwaarden, en/of impliciet te beschouwen door conservatieve brandveiligheidseisen

- **Thermische belasting**

De thermische belasting is geen belasting die zoals de mechanische belasting altijd in beschouwing wordt genomen. Deze belasting wordt bepaald door de nettowarmtestroomdichtheid op de elementen. Deze nettowarmtestroomdichtheid (h_{net}) wordt uitgedrukt in W/m^2 .

De thermische belasting is afhankelijk van het temperatuurverloop in het brandcompartiment. Deze kunnen op verschillende manieren bepaald worden. De Eurocode geeft een mogelijkheid om deze te bepalen aan de hand van de standaardbrandkromme (hoofdstuk 3.2.1.).

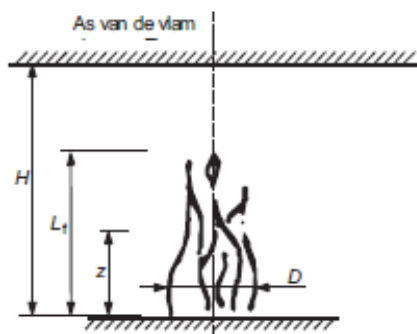
Een andere mogelijkheid is om de temperatuur te bepalen aan de hand van een zonemodel. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat de massa en de energie binnen een brandcompartiment behouden blijven (Anzion & Den Ouden & Winnen, 2012). Daarmee is de temperatuur in de ruimte overal gelijk. Het is ook mogelijk om het brandcompartiment op te splitsen in een twee-zone model. Hierbij is de temperatuur rondom de brand constant (zone één) en de temperatuur in de rooklaag is constant (zone 2). Wanneer er een flash-over plaatsvindt zal een twee-zone model overgaan in een één-zone model. In figuur 3.10 is een twee-zone model te zien en in figuur 3.11 is een één-zone model. Aan de hand van deze zone modellen kunnen er specifieke brandkrommen gemaakt worden.



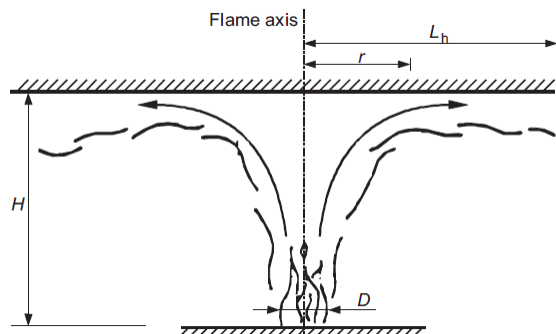
Figuur 3.13, CFD-model van een brand. Overgenomen uit "Research program on compartment fires", 2018 (<https://certec.upc.edu/en/research/fire-in-compartment-research>). Copyright 2018, Universitat Politècnica de Catalunya

Het is ook mogelijk om via veldmodellen een inschatting te maken van de temperatuurlast. Dat betekent dat er via een CFD-model zeer nauwkeurig de temperatuur bepaald kan worden. Deze zijn zeer complex. Het nut van deze modellen is niet heel groot in een bouwproject. Deze worden dan ook over het algemeen gebruikt voor onderzoeken naar de verspreiding en de warmte van rook.

Een laatste optie is het berekenen van de temperatuurstijging van een lokale brand. Dat houdt in dat die temperatuur geldt op één bepaalde plek en niet in het hele brandcompartiment. Het is daarmee mogelijk om de temperatuur te bepalen in grote brandcompartimenten. Voor bijvoorbeeld een open parkeergarage is dit een goede manier om de temperatuur te berekenen. Voor het bepalen van de temperatuur van een lokale brand zijn twee methoden: de methode van Heskestadt en de methode van Hasemi. Het uitgangspunt van de methode van Heskestadt is te zien in figuur 3.13 en het principe van de methode van Hasemi is in figuur 3.14 te zien. De methode van Heskestadt gaat ervan uit dat de hete zones niet het plafond raken. De methode van Hasemi gaat wel uit van hete zones die het plafond raken.



Figuur 3.14, lokale brand volgens methode Heskestadt. Overgenomen uit NEN-EN 1991-1-2+C1 Eurocode 1: Belastingen op constructies – Deel 1-2: Algemene belastingen – Belasting bij brand [NEN Connect]. Geraadpleegd op 14 mei 2018, van <https://connect.nen.nl/Standard/Detail/160413?companyId=11921&collectionId=0>



Figuur 3.15, lokale brand volgens methode Hasemi. Overgenomen uit NEN-EN 1991-1-2+C1 Eurocode 1: Belastingen op constructies – Deel 1-2: Algemene belastingen – Belasting bij brand [NEN Connect]. Geraadpleegd op 14 mei 2018, van <https://connect.nen.nl/Standard/Detail/160413?companyId=11921&collectionId=0>

3.4. Regelgeving van constructies in buitengewone situaties

Deze voorstudie is een vroeg stadium uitgewerkt door Monica Suijs. Aan het einde van het onderzoek is deze door mijzelf aangepast. Ook de persoonlijke communicatie met de heer Rick Dielissen en mevrouw Suzan van den Winkel is voor deze voorstudie door mijzelf gedaan.

3.4.1. Gevolgklassen volgens NEN-EN 1990

Om onderscheid te maken tussen de grootte van gebouwen zijn er in de Eurocode gevolgklassen opgenomen. De verschillende gevolgklassen zijn in tabel 3.2 te vinden.

Gevolgklasse CC	Omschrijving
CC3	Grote gevolgen ten aanzien van het verlies van mensenlevens, of zeer grote economische gevolgen, sociale gevolgen of gevolgen voor de omgeving.
CC2	Middelmatige gevolgen ten aanzien van het verlies van mensenlevens, aanzienlijke economische gevolgen, sociale gevolgen of gevolgen voor de omgeving.
CC1	Geringe gevolgen ten aanzien van het verlies van mensenlevens, of kleine of verwaarloosbare economische gevolgen, sociale gevolgen of gevolgen voor de omgeving

Tabel 3.2, definitie van gevolgklassen. Aangepast overgenomen uit NEN-EN 1990 +A1+A1/C2: Eurocode 0: Grondslagen van het constructief ontwerp [NEN Connect]. Geraadpleegd op 22 februari 2018, van <https://connect.nen.nl/Standard/Detail/162984?compId=11921&collectionId=0>

3.4.2. Aanbevolen ontwerpstrategieën volgens de NEN-EN 1991-1-7

Voor de bepaling van de ontwerpstrategie moet de gevolgklasse bekend zijn. De gevolgklasse CC2 wordt voor de bepaling van de ontwerpstrategie in twee categorie onderverdeeld: risico laag en risico hoog. In bijlage C is deze verder uitgewerkt.

De strategieën voor de verschillende gevolgklassen zijn:

- CC1: Gebouwen in deze gevolgklasse moeten voldoende stabiliteit leveren bij normaal gebruik. Er is geen beschouwing van buitengewone belasting noodzakelijk.
- CC2a: Deze gevolgklasse is een aanvulling op gevolgklasse CC1. Het aanbrengen van trekbanden is in horizontale en verticale richting verplicht.

- CC2b: Voor deze gevolgklasse gelden dezelfde ontwerpstrategieën als voor CC2a. Voor gevolgklasse CC2b mag echter ook gekozen worden voor het denkbeeldig verwijderen van iedere dragende kolom of ligger.
- CC3: Er moeten systematisch risicoanalyses uitgevoerd worden. In een risicoanalyse is rekening gehouden met voorziene en onvoorziene gevaarlijke omstandigheden.

Voor de gevolgklasse CC2 is volgens de Eurocode het aanbrengen van trekbandwapening verplicht. Echter wordt de werking van trekbandwapening in de literatuur in twijfel getrokken (De Boer, 2012). Volgens de heer Rick Dielissen & mevrouw Suzan van den Winkel (persoonlijke communicatie, 8 juni 2018) zeggen experts dat trekbandwapening ruimte nodig heeft om de horizontale belasting af te kunnen dragen. Wanneer dat niet kan (bijvoorbeeld trekbanden in een hoekveld) is de oplossing met trekbandwapening niet veilig.

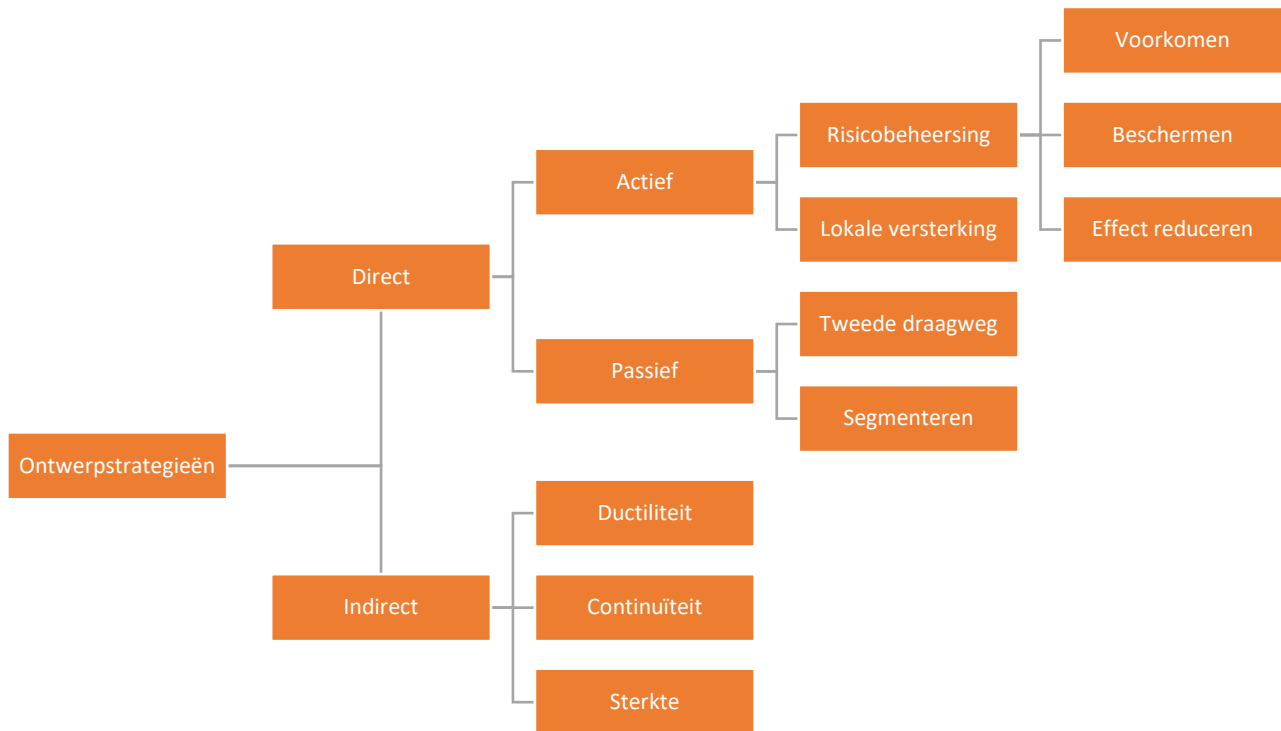
3.4.3. Toetsing robuustheid in de praktijk

Volgens de Eurocode is de robuustheid: “Het vermogen van een constructie om weerstand te bieden aan gebeurtenissen als brand, ontploffingen, stootbelastingen of de gevolgen van een menselijke fout, zonder te zijn beschadigd in een mate die niet in verhouding staat tot de oorspronkelijke oorzaak”. Bij het verlenen van de vergunning door de gemeente kan het volgens de heer Rick Dielissen en mevrouw Suzan van den Winkel (persoonlijke communicatie, 8 juni 2018) per gemeente afhangen hoe de robuustheid van de constructie wordt getoetst.

Volgens de heer Rick Dielissen en Mevrouw Suzan van den Winkel (persoonlijke communicatie, 8 juni 2018) hangt dit af van de beschikbare kennis bij de gemeente. Zo stellen sommige gemeenten strengere eisen ten aanzien van de robuustheid. Bij andere gemeenten is het gebruikelijk om het bouwbesluit aan te houden en geen verdere eisen te stellen aan de robuustheid van constructies.

3.4.4. Ontwerpstrategieën

Er zijn verschillende ontwerpstrategieën om de robuustheid van constructies te vergroten (figuur 3.16).



Figuur 3.16, schema van ontwerpstrategieën.

De ontwerpstrategieën zijn in te delen in directe en indirecte strategieën. Bij de directe strategie wordt er gekeken naar hoe de buitengewone situatie vermeden kan worden. Dat kan passief maar ook actief. De actieve benadering is gebaseerd op aannames voor het gebouw. De constructie wordt niet robuuster gemaakt bij deze strategie. De passieve strategie is gebaseerd op het bezwijken van elementen. De constructie wordt geanalyseerd op het gedrag dat optreedt bij het bezwijken van constructieve elementen.

Bij een indirecte strategie is de constructie ontworpen op basis van ontwerpregels (De Boer, 2012). Dat maakt het projectonafhankelijk. De ontwerpregels eisen aan ductiliteit, sterkte en continuïteit.

4. Uitgangspunten hoofdonderzoek

Alle berekeningen uit het hoofdonderzoek zijn conform de Eurocode uitgevoerd. De voorschriften die bij deze scriptie van toepassing zijn:

Eurocode 0: Grondslagen

- NEN-EN 1990: Grondslagen van het constructief ontwerp

Eurocode 1: Belastingen op constructies

- NEN-EN 1991-1-1: Algemene belastingen - Volumieke gewichten, eigen gewicht, opgelegde belastingen voor gebouwen
- NEN-EN 1991-1-2: Algemene belastingen - Belasting bij brand
- NEN-EN 1991-1-3: Algemene belastingen - Sneeuwbelasting
- NEN-EN 1991-1-5: Algemene belastingen - Thermische belasting

Eurocode 2: Ontwerp en berekening van betonconstructies

- NEN-EN 1992-1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen
- NEN-EN 1992-1-2: Algemene regels - Ontwerp en berekening van constructies bij brand

Eurocode 3: Ontwerp en berekening van staalconstructies

- NEN-EN 1993-1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen
- NEN-EN 1993-1-2: Algemene regels - Ontwerp en berekening van constructies bij brand

4.1. Constructief ontwerp

Voor de uitwerking van het onderzoek wordt de casus vereenvoudigd. Het oorspronkelijke ontwerp vanuit Volantis is te ingewikkeld voor dit onderzoek. Bij het vereenvoudigen van de constructie zal zoveel mogelijk het oorspronkelijke ontwerp aangehouden worden. Het vereenvoudigde ontwerp zal het uitgangspunt worden van het hoofdonderzoek. Dit nieuwe ontwerp wordt in dit hoofdstuk nader uitgelegd. Het ontwerp zal eerst onder 'normale' omstandigheden via de uiterste grenstoestand uitgerekend worden.

In dit hoofdstuk wordt alleen het ontwerp nader toegelicht. Plattegronden en doorsnedes zijn in bijlage F01 en F02 te vinden. Deze tekeningen zijn door Monica Suijs gemaakt en dienen alleen ter raadpleging.

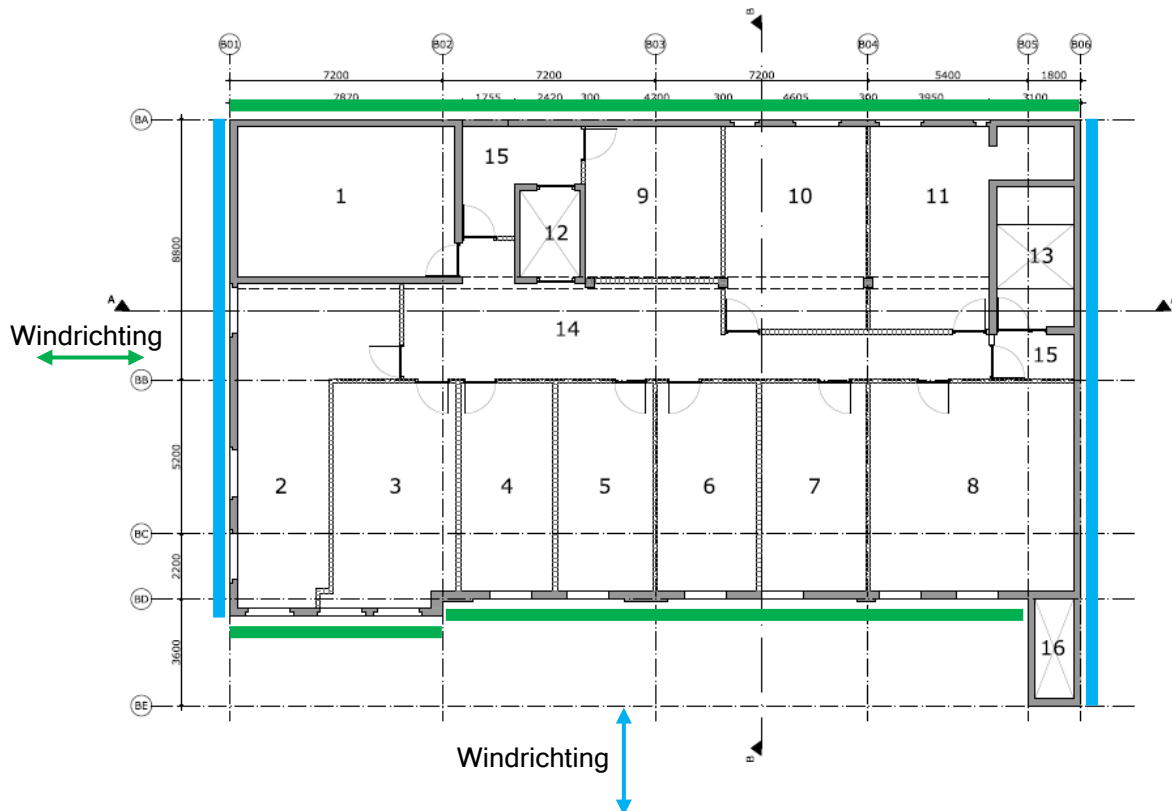
4.1.1. Algemene gegevens van de constructie

De hoofddraagconstructie is een combinatie van dragende betonnen wanden en een skelet met balken en kolommen, wederom ook van beton. Het ontwerp komt hiermee het dichtste in de buurt bij het origineel. Dat maakt het onderzoek representatief voor Volantis. Tevens worden de meeste constructies op deze manier gebouwd, wat de representativiteit ten goede komt.

4.1.2. Stabiliteit

De stabiliteit van het gebouw kan worden ontleend aan de wandenstructuur. Belangrijk zijn de gevelwanden. Deze wanden zijn in staat om de horizontale krachten veroorzaakt door wind op te

nemen. Er geen extra maatregelen nodig tegen windbelasting. Er zit al standaard een kern in het gebouw bij de galerij, daarom zal de kern ook meewerken aan de stabiliteit, ook al is dat is niet noodzakelijk. Het berekenen van de stabiliteit is vanwege de complexiteit en tijdsbesteding buiten dit onderzoek gelaten. In het hoofdonderzoek wordt hier ook niet op in gegaan.



Figuur 4.1, windafdracht van gebouwdeel B

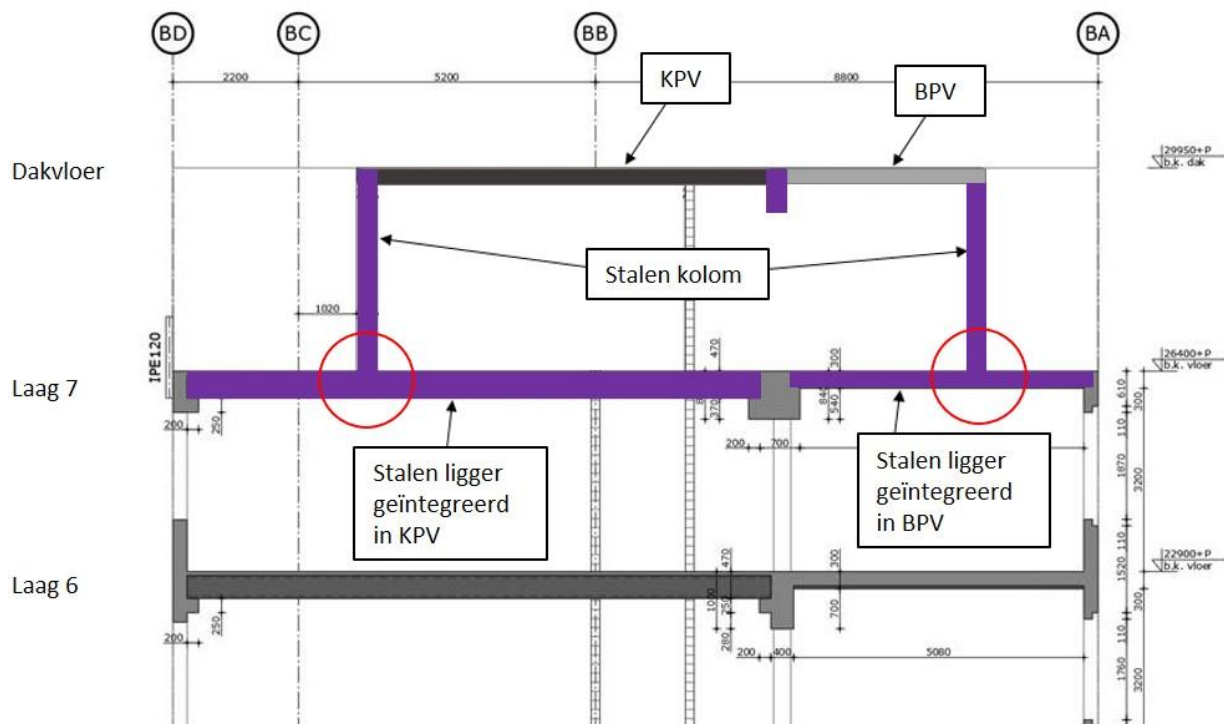
4.1.3. Dakconstructie

Als eerste wordt het dak uitgewerkt. Het dak brengt ook de nodige uitdagingen met zich mee in combinatie met laag 7. Het lastige aan het dak is dat deze tussen as BA en BB, maar tussen as BC en BD een stuk naar binnen ligt ten opzichte van laag 7. Hierdoor is er op laag 7 een dakterras gerealiseerd.

De vloer tussen as BD en de middenbalk wordt uitgevoerd als een kanaalplaatvloer. Deze kanaalplaatvloer is 400 millimeter hoog en wordt opgelegd op betonneuzen. Hierbij komt de vloer op de betonneus te liggen, maar is er wel een koppeling met de rest van de constructie. Voor tussen as BA en de middenbalk is er voor een breedplaatvloer gekozen. Er is gekozen voor een verschil in vloeren. Dit heeft te maken met onder andere de lift. De afmetingen rondom de lift zijn vrij klein om een kanaalplaat te leggen. Vanwege de uitvoering is daarom gekozen voor een breedplaatvloer. Er is nog een aspect wat de keuze voor een verschil in vloertype heeft bepaald. Zo is een kanaalplaatvloer lichter dan een breedplaatvloer. De overspanning van de kanaalplaatvloer is groter dan die van de breedplaatvloer. Met deze verschillen is het de bedoeling

om meer evenwicht in de middenbalk te creëren. Wanneer er een groot verschil is in belasting tussen beide kanten van een ligger, zal deze de neiging hebben te roteren. Om dit tegen te gaan is er een stijvere balk nodig. Wanneer er evenwicht is tussen de belastingen aan beide kanten zal de ligger niet roteren en zijn er geen aanvullende maatregelen noodzakelijk.

De structuur van het dak is te zien in figuur 4.3. Tussen as B01 en B02 is er een wandenstructuur. De kanaalplaatvloer wordt daarbij via een betonneus op de wand gelegd. De breedplaatvloer wordt tijdens de bouwphase toch onderstempeld, waardoor de schil in de wand kan worden afgesteld.

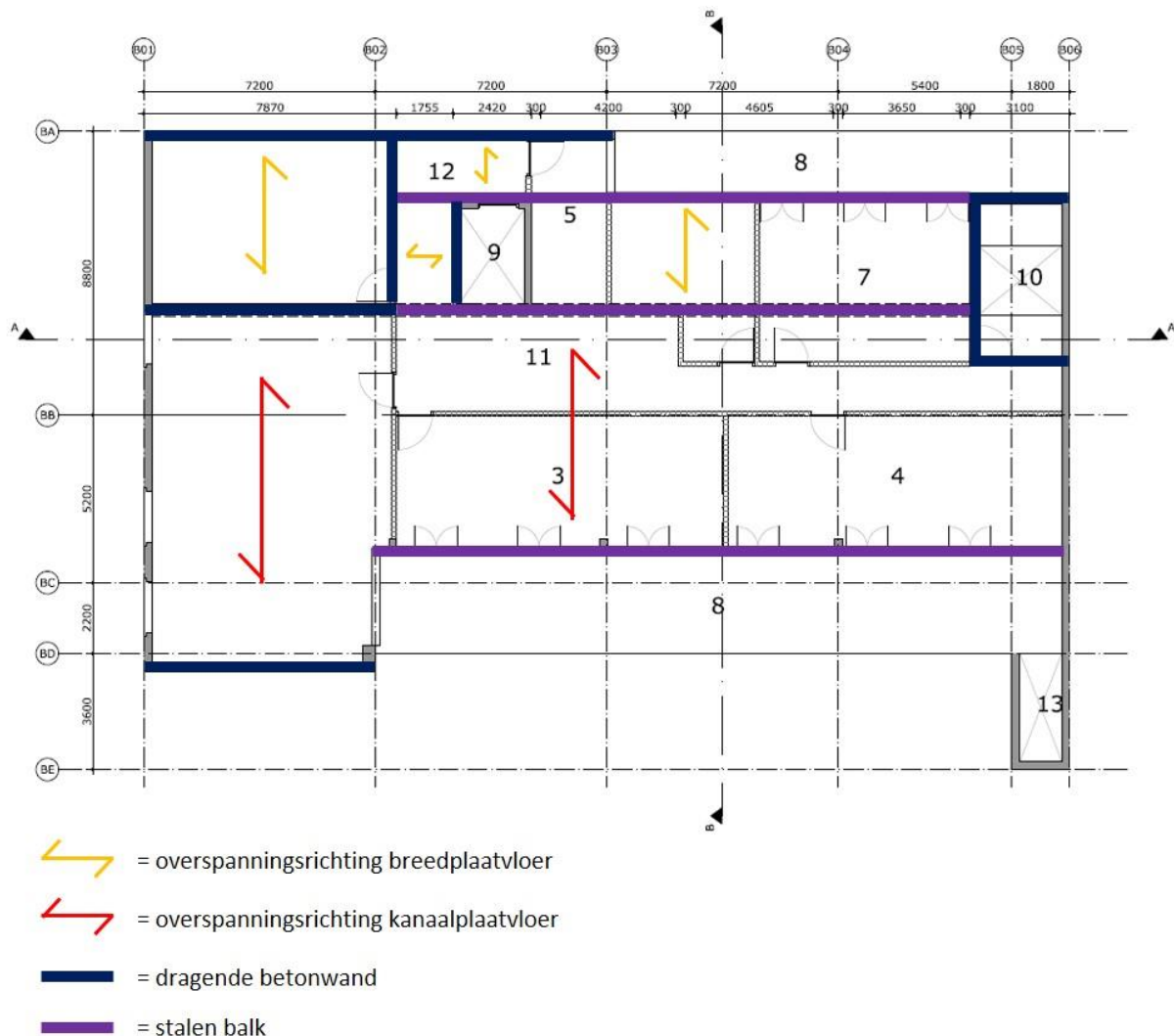


KPV = Kanaalplaatvloer

BPV = Breedplaatvloer

Figuur 4.2, doorsnede BB ter hoogte van laag 6 t/m de dakvloer

De skelet-structuur tussen as B02 en B06 wordt in staal uitgevoerd. De constructie ligt vanwege het dakterras een paar meter terug ten opzichte van de constructie van laag 7 (zie figuur 4.2). Hierdoor komt de kolom die het dak draagt op een andere plek uit dan de wand die laag 7 draagt. Dat is te zien in figuur 4.2, aangegeven met de rode cirkels. Hierdoor is er een extra balk nodig om de puntlast op te vangen. De balk kan wederom van beton worden gemaakt. Dit heeft als nadeel dat deze tijdens de bouwphase moet worden onderstempeld. Het is dan noodzakelijk om deze over het hele gebouw door te stempelen. Gezien dit feit is er besloten om een stalen ligger toe te passen. Deze kan meteen volledig belast worden. Echter als de kolom bij de rode cirkel



Figuur 4.3, schematische weergave van de draagstructuur van het dak

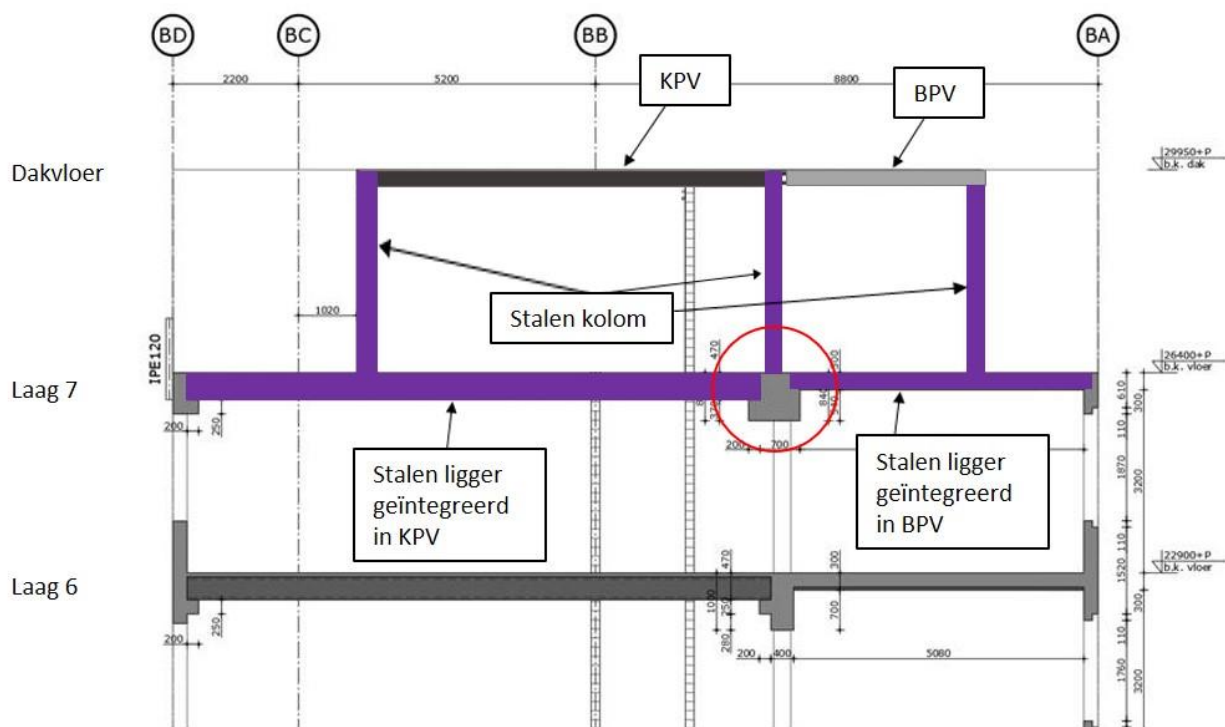
van beton is, moet er een beton-op-staal verbinding gecreëerd worden. Dit is niet gewenst. Om dit probleem op te lossen wordt het skelet van de dakconstructie uit staal vervaardigd. Met deze keuze is er op de plek van de rode cirkel een staal-op-staal verbinding. Vanuit de uitvoering gezien is dit een goedkopere, eenvoudiger en snellere oplossing.

Voor de middenbalk in het dak zijn ook meerdere mogelijkheden. De uitdaging in deze aansluiting zit in het hoogteverschil van de vloeren en een verschil in vloertypen. Daarnaast is het van belang dat de ligger ook nog aangesloten kan worden aan een kolom. Het toepassen van een SFB-ligger is mogelijk. Een SFB-ligger is een standaard HE-profiel waar een stalen strip onder gelast is. Op die strip kan de vloer opgelegd worden. De druklaag van een breedplaatvloer moet bij deze optie wel bevestigd worden aan de ligger door middel van aangelaste koppelstaven. Het voordeel van deze optie is dat de aansluiting van ligger op kolom een eenvoudige aansluiting is. Een andere optie is de ligger uitvoeren als een THQ-ligger/pet-ligger. Een pet-ligger is een kokerprofiel met een uitstekende flens aan de onderkant. Deze dient, net als de strip van de SFB-

ligger, als oplegvlak voor de vloer. Het leggen van de vloer is met deze oplossing makkelijk. Alleen is de verbinding tussen ligger en kolom een stuk ingewikkelder. De breedplaatvloer zou in deze situatie echter wel op de koker van de pet-ligger gelegd kunnen worden. Dat is een eenvoudige manier en zo hoeven er geen koppelstaven aan de ligger gelast worden. Met deze gedachte is besloten om de ligger als pet-ligger uit te voeren. Dit is vanuit de uitvoering geredeneerd een makkelijkere en snellere oplossing.

4.1.4. Laag 7

Op laag 7 zijn zes hotelkamers te vinden. Deze worden verbonden door middel van een gang. Daarnaast hebben suite 3, 4 en 7 een dakterras. De constructieve opbouw van deze laag is in de basis hetzelfde als de dakconstructie. Dat betekent dat er tussen stramien BA en BB een betonnen balk ligt. Tussen de middenbalk en as BD ligt een kanaalplaatvloer van 400 millimeter hoog. De overspanning is in deze balk dusdanig groot dat met een breedplaatvloer deze overspanning nauwelijks te halen valt. Tussen as BA en de middenbalk ligt een breedplaatvloer. De keuze voor een breedplaatvloer heeft dezelfde reden als in het dak. Er is een kleiner verschil in krachten in de middenbalk en de uitvoering met betrekking tot de lift is met een breedplaatvloer beter te bewerkstelligen.



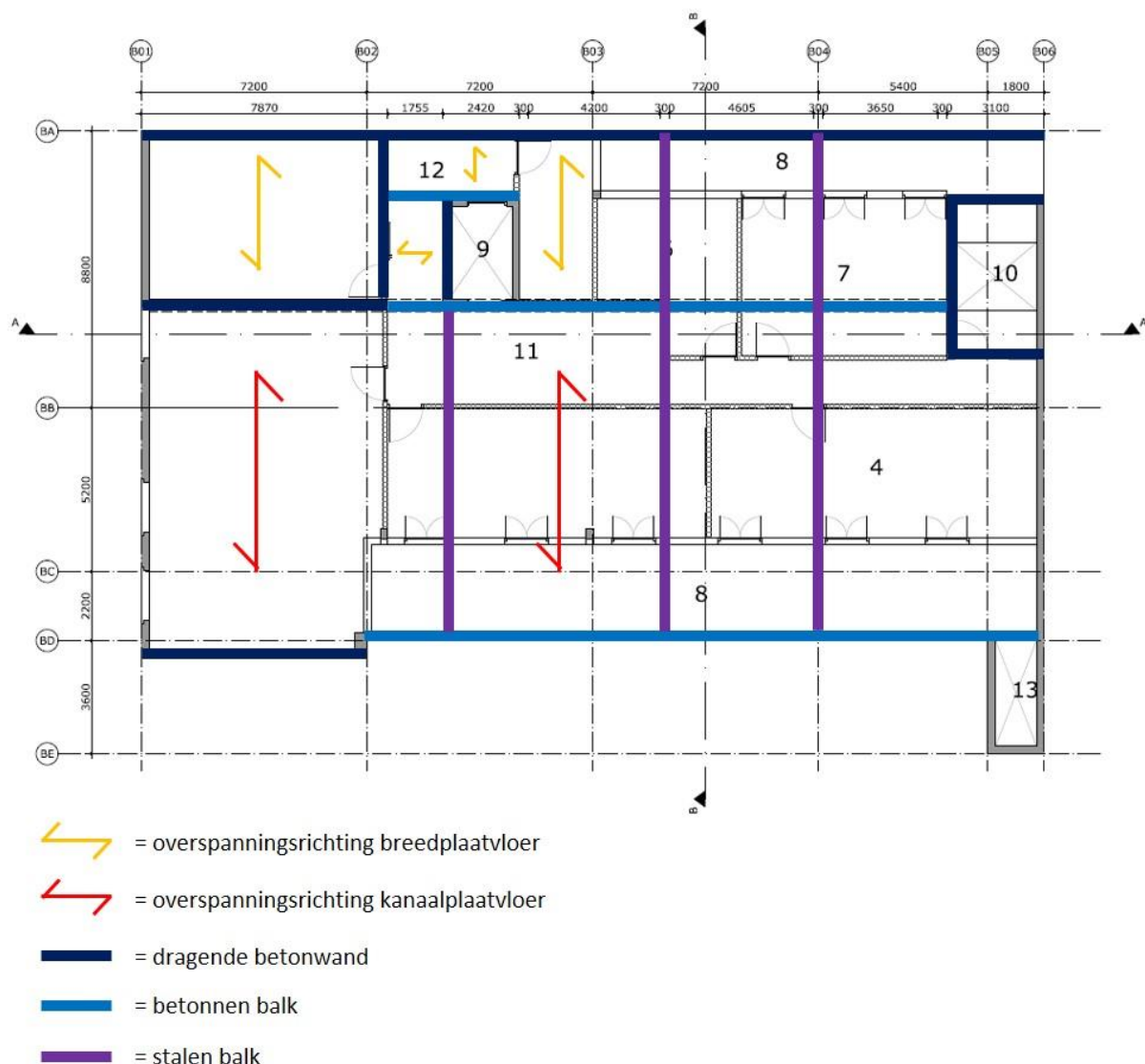
KPV = Kanaalplaatvloer

BPV = Breedplaatvloer

Figuur 4.4, doorsnede BB ter hoogte van laag 6 t/m het dak

Doordat de middenbalk van beton is en de kolommen van het dak die op die balk aansluiten van staal, zal er een staal-op-beton verbinding gerealiseerd moeten worden. Deze plek is in figuur 4.4 aangegeven met de rode cirkel.

De stalen kolom wordt op het beton verbonden. Onder de kopplaat van de stalen kolom wordt een krimparme mortel aangebracht. De stalen kolom wordt door middel van ankers verbonden aan het beton. De ankers worden dus gelijk in het beton gestort. Verder wordt de kanaalplaatvloer op wederom een betonneus gelegd. In de betonnen balk wordt deze via beugels aan de balk gestort. De betonneus bij de gevelwand wordt, nets als bij de balk, tegelijk met de wand gestort.



Figuur 4.5, schematische weergave van de draagstructuur van laag 7

4.1.5. Laag 1 t/m 6

De overige lagen van bouwdeel B worden in één hoofdstuk besproken. De lagen 1 t/m 6 lijken op elkaar en de constructie verschilt heel weinig tussen de verdiepingen. De opbouw wordt daardoor in dit hoofdstuk besproken en afwijkingen per bouwlaag worden vermeld.

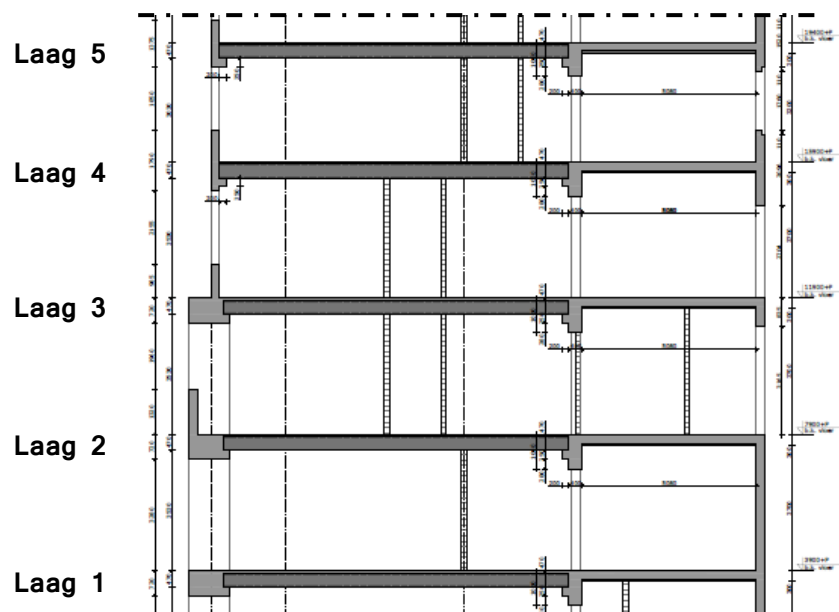
De vloeren zijn hetzelfde als in laag 7. Bij de overige lagen is er geen stalen balk in de vloer geïntegreerd. Dit heeft ermee te maken dat er geen puntlasten opgevangen hoeven worden. De structuur bestaat uit dragende wanden die de vloeren dragen. Net als in laag 7 is er tussen as BA en BB een middenbalk aanwezig. Deze wordt gedragen door 4 betonnen kolommen. 2 van deze kolommen zijn onderdeel van een kern. De stabiliteit van de kern wordt buiten beschouwing gelaten. De middenbalk wordt voor enkele verdiepingen uitgerekend, dit heeft te maken met het feit dat niet elke verdieping hetzelfde is qua indeling. Zo zijn er op verdieping 3, 4, 5 en 6 hotelkamers te vinden terwijl verdieping 2 een restaurant bevat. De variabele belasting op verdieping 2 is daarmee hoger dan op de verdiepingen met hotelkamers (ongeveer 5kN/m^2 - $1,75\text{kN/m}^2$).

De kanaalplaatvloeren zijn net als op de zevende verdieping 400 millimeter hoog. De opleg is wederom op betonnen neuzen die aan de wand/balk worden vast gestort.

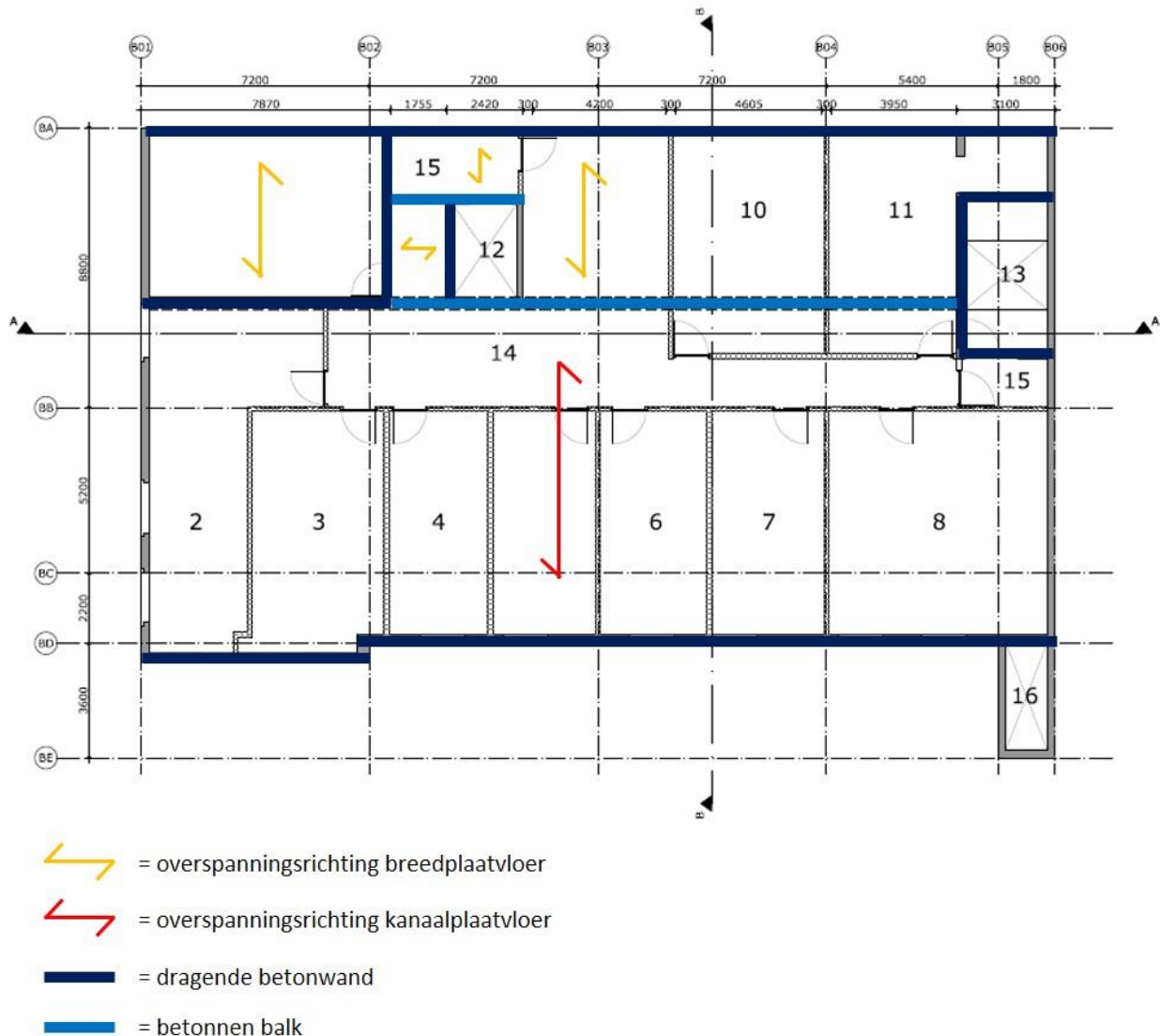
De breedplaatvloeren zijn 220 millimeter hoog. De vloer wordt in één keer gestort met de wand, wat betekent dat er een monolithische constructie ontstaat.

De wand in de voorgevel verspringt in laag 3 (figuur 4.6). Dat betekent dat de lagen 0, 1, 2 en 3 een dikkere gevelwand hebben dan de lagen 4, 5, 6 en 7. Onderin het gebouw is de

normaaldrukkracht groter dan bovenin het gebouw. Meer beton is een goede keuze omdat beton normaaldrukkracht kan opnemen. De gevelwanden bevatten in alle lagen flinke sparingen. Het voordeel hiervan is dat de wanden, met name op de onderste verdiepingen, geschematiseerd kunnen worden als raamwerk met balken en kolommen.



Figuur 4.6, doorsnede BB ter hoogte van laag 1 t/m 5



Figuur 4.7, schematische weergave van de draagstructuur van laag 1 t/m 6

4.1.6. Begane grond en fundering

De begane grond is in de huidige casus de fundering. In het oorspronkelijke ontwerp zouden er onder de begane grond nog twee kelderlagen aangelegd worden. De functie hiervan is het creëren van ruimte voor een parkeergarage. Voor het onderzoek naar de tweede draagweg is de kelder achterwege gelaten. Een parkeergarage bevat, qua brandveiligheid en constructie, andere eisen dan een hotel/logiesfunctie. Dit maakt de parkeergarage niet relevant voor de casus. Vanwege dit feit is in overleg met Volantis de kelderlaag achterwege gelaten. Hierdoor is de begane grond ook de fundering. De vloer is een plaatvloer met een hoogte van 1000 millimeter. Ook de aansluitingen van de wanden en kolommen op de begane grond zijn monolithisch.

4.2. Raamwerkberekening

Voor het hoofdonderzoek wordt er een raamwerk opgesteld. Dit raamwerk zal ten behoeve van de tweede draagweg uitgewerkt worden. Het raamwerk zal in eerste instantie worden opgesteld met de hand, waarna het in Technosoft Raamwerken (versie 6) zal worden ingevoerd.

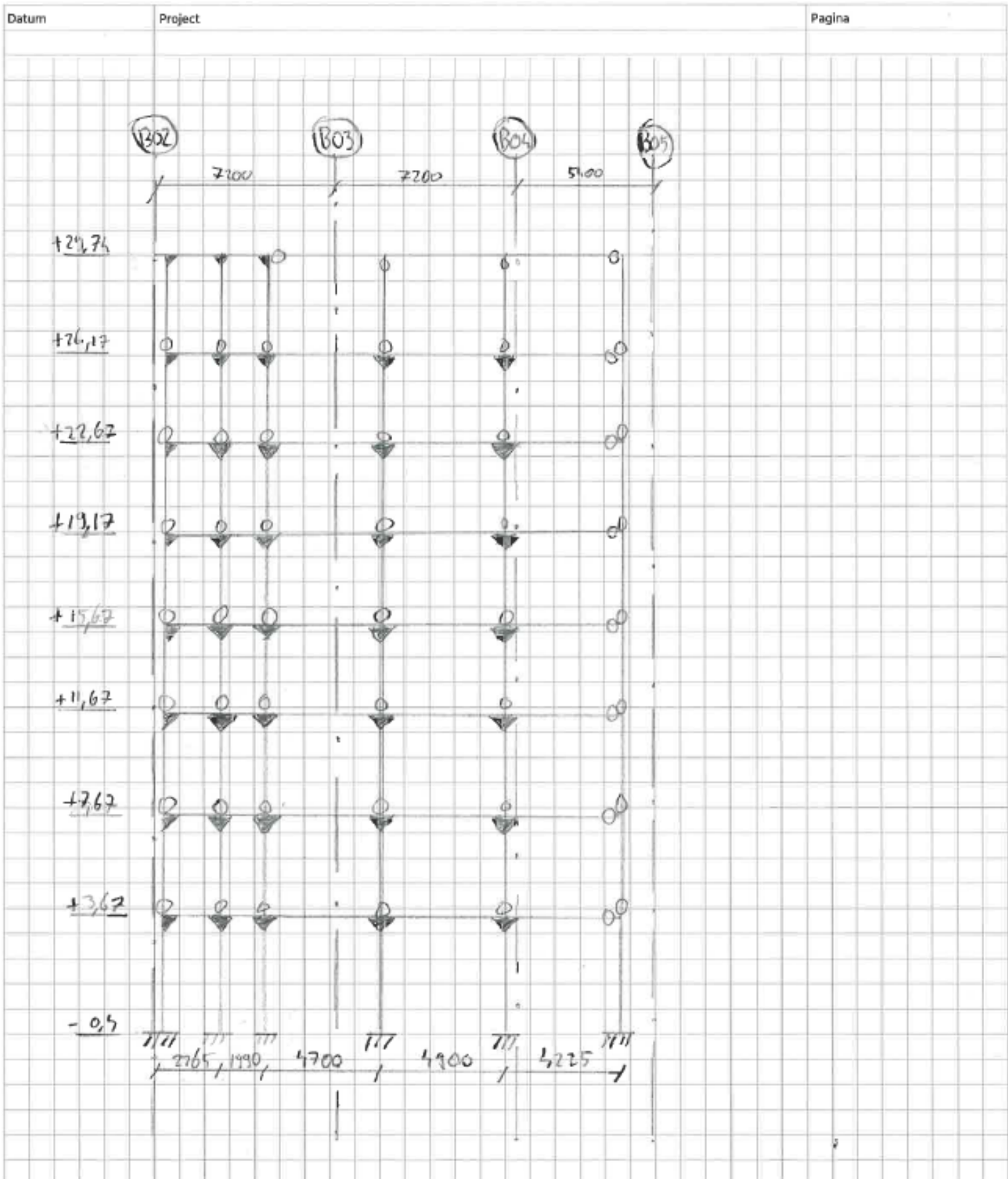
De positie waar het raamwerk is gemaakt is ter plaatse van de middenbalk. Deze plaats is voor een raamwerk het relevantst. Dit komt omdat ter hoogte van laag 3 de gevel verspringt (zie figuur 4.6). Dit heeft als gevolg dat de belasting van de lagen 7 tot en met 4 excentrisch aangrijpt ten opzichte van de gevel van laag 3 tot en met de begane grond. Dat maakt de berekening ingewikkeld. In overleg met Volantis is besloten om dit niet uit te werken.

Het raamwerk bij de middenbalk is interessant aangezien dit geen wand is met sparingen, maar een normaal raamwerk waarbij liggers en kolommen op elkaar aansluiten. Voor het hoofdonderzoek is het ook van belang om te kijken naar risicogebieden voor brand. Wanneer er gekeken wordt naar de indeling van de ruimten, is te zien dat de keuken bij de middenbalk ligt. De keuken is een risicogebied voor brand vanwege de aanwezigheid van veel apparatuur en hoge temperaturen. Daardoor is er een kans dat er brand uitbreekt. Dit is de meest waarschijnlijke plek voor de brandhaard in het hoofdonderzoek.

In bijlage D hoofdstuk 4.4. is de invoer in Technosoft Raamwerken (versie 6) uitgewerkt. Daarbij is aangegeven hoe het raamwerk is ingevoerd in Technosoft met belastinggevallen en belastingcombinaties. Ook de uitvoer in de uiterste grenstoestand en in de bijzondere combinatie is daar uitgewerkt.

4.2.1. Schematisering

Om het raamwerk in Technosoft Raamwerken (versie 6) in te voeren, is het van belang om een goede schematisering te hebben. Deze schematisering is op pagina 28 te zien in figuur 4.8. Op pagina 29 zijn de keuzes van de schematisering toegelicht.



Figuur 4.8, schematisering van het raamwerk ter plaatse van de middenbalk

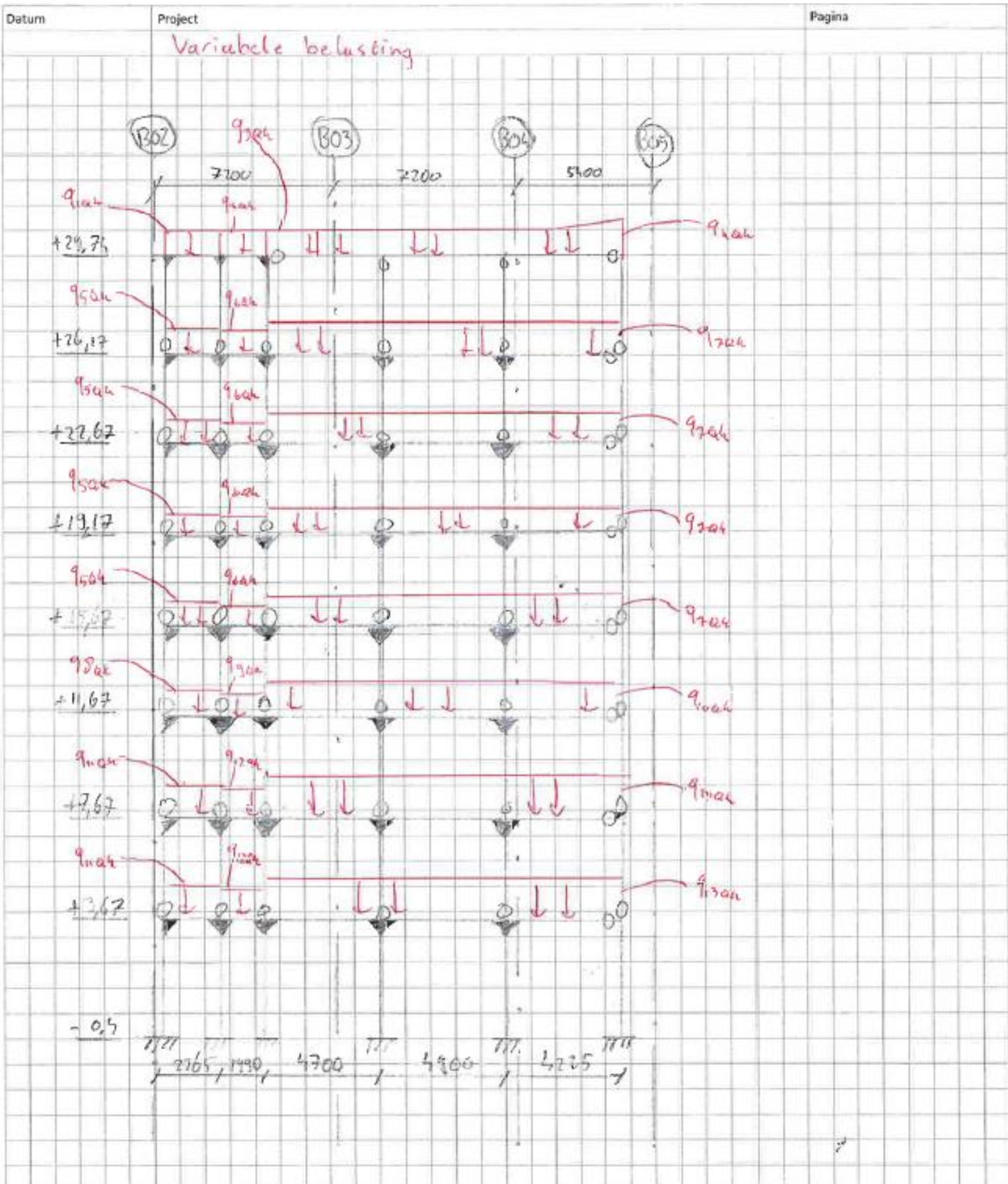
Er is voor gekozen om het raamwerk compacter te maken dan de hele breedte van het gebouw. Nu is alleen de constructie tussen as B02 en B05 opgenomen in de schematisering. Dit heeft met een aantal zaken te maken. Zo zit er tussen as B01 en B02 een wand. Deze zal weinig bijdragen aan het raamwerk. De momenten die in deze richting op de wand werken zijn niet groot. Hierdoor kan in de schematisering die wand weggelaten worden. Tussen as B05 en B06 zit een trappenhuis. Het trappenhuis heeft verder geen effect op het raamwerk. Mede hierdoor is er besloten om het trappenhuis buiten beschouwing te laten.

De stabiliteit binnen het raamwerk wordt verleend door momentvaste verbindingen. Dit houdt het raamwerk voor de berekening stabiel. In de praktijk ontleent het raamwerk zijn stabiliteit aan de gevelwanden die de windbelasting van het gebouw tot zich nemen. Daardoor is het een geschoord systeem.

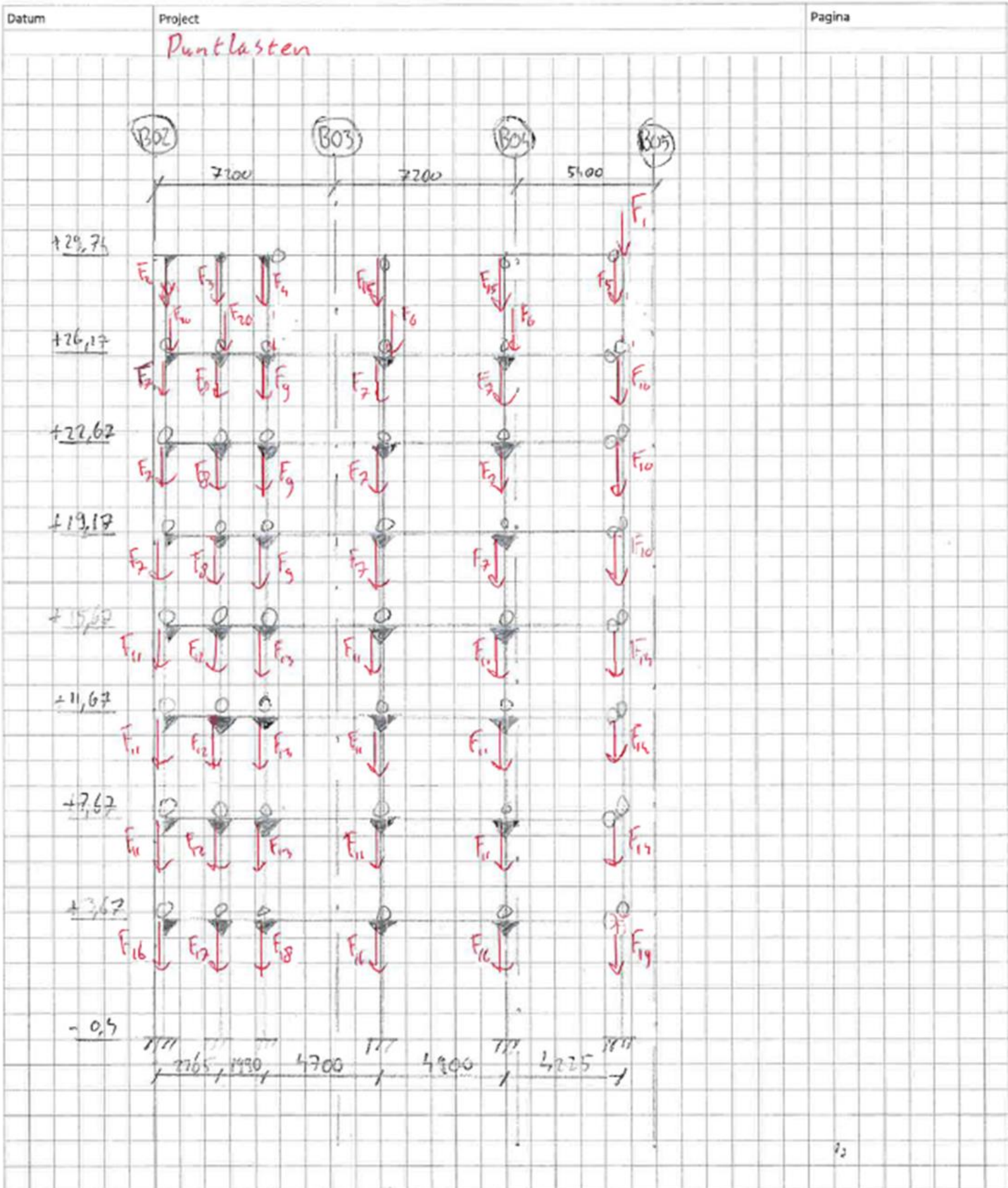
Zoals eerder is beschreven, wordt het dak gedeeltelijk gemaakt van staal. Het dak is dus deels beton en deels staal. Dit geeft met name in de verbindingen een uitdaging. In de schematisering is ervoor gekozen om deze verbindingen scharnierend te maken. De stalen ligger is dus scharnierend opgelegd op de betonnen kolom en de betonnen wand. Tussendoor is de ligger scharnierend opgelegd op twee stalen kolommen. De staalverbindingen momentvast uitvoeren kost veel geld en tijd. De betonnen kolommen bij de wand en de lift zijn wel momentvast geschematiseerd in combinatie met de ligger. De ligger en de kolommen worden in één lading gestort, waardoor deze constructie monoliet wordt. Hierbij horen momentvaste verbindingen. Deze zorgen er mede voor dat het raamwerk ter hoogte van dak stabiel is. De onderkant van de kolommen zijn scharnierend verbonden. Hierdoor ontstaat er per verdieping een half-portaal. Wanneer een nieuwe verdieping gestort wordt, zal deze bij de vloer ophouden. Er zal een verbinding zijn tussen de ligger en de kolom, maar deze zal weinig tot geen moment op zich nemen. Deze verbindingen zijn in de schematisering dan ook als scharnierend opgenomen. Dit herhaalt zich over het hele gebouw. De verbinding van de betonnen ligger met de wand bij het trappenhuis is ook scharnierend geschematiseerd. Een starre verbinding van een ligger middenin een wand vereist een behoorlijke hoeveelheid wapening en detaillering. Vanwege deze ingewikkeldheid is er in overleg met Volantis besloten om deze verbinding scharnierend te schematiseren. Het laatste onderdeel is de verbinding van het raamwerk op de fundering. De fundering in het raamwerk is een betonplaat van een meter dik. Hierdoor is het realistischer om deze verbinding star te schematiseren. In werkelijkheid is dit niet volledig star, maar een verende inklemming.

Op de pagina's 33 tot en met 35 zijn de belastingen op het raamwerk in de schematisering getekend.

Pagina 33 van 78



Figuur 4.10, Variabele belasting op het raamwerk



Figuur 4.11, Puntlasten op het raamwerk

4.2.5. Belastingen

Op het raamwerk zitten verschillende belastingen. Zonder belastingen is er weinig te rekenen aan de constructie. Hieronder zijn de waardes van de belastingen te zien. Voor de berekening van de belastingen wordt verwezen naar bijlage D hoofdstuk 4.3.

q-lasten:

$q_{1G,K}$	Plat dak belasting	=	24,6	kN/m
$q_{1Q,K}$	Sneeuw	=	2,4	kN/m
$q_{2G,K}$	Plat dak belasting	=	21,7	kN/m
$q_{2Q,K}$	Sneeuw	=	2,1	kN/m
$q_{3G,K}$	Plat dak belasting	=	37,5	kN/m
$q_{3Q,K}$	Sneeuw	=	3,7	kN/m
$q_{4G,K}$	Plat dak belasting	=	31,1	kN/m
$q_{4Q,K}$	Sneeuw	=	3,1	kN/m
$q_{5G,K}$	Vloerbelasting	=	44,1	kN/m
$q_{5Q,K}$	Veranderlijk A-vloeren	=	14,4	kN/m
$q_{6G,K}$	Vloerbelasting	=	40,8	kN/m
$q_{6Q,K}$	Veranderlijk A-vloeren	=	13,2	kN/m
$q_{7G,K}$	Vloerbelasting	=	58,7	kN/m
$q_{7Q,K}$	Veranderlijk A-vloeren	=	19,9	kN/m
$q_{8G,K}$	Vloerbelasting	=	44,1	kN/m
$q_{8Q,K}$	Combinatie veranderlijk A-vloeren & C-bijeenkomst	=	25,7	kN/m
$q_{9G,K}$	Vloerbelasting	=	40,8	kN/m
$q_{9Q,K}$	Combinatie veranderlijk A-vloeren & C-bijeenkomst	=	23,2	kN/m
$q_{10G,K}$	Vloerbelasting	=	58,7	kN/m
$q_{10Q,K}$	Combinatie veranderlijk A-vloeren & C-bijeenkomst	=	36,5	kN/m
$q_{11G,K}$	Vloerbelasting	=	44,1	kN/m
$q_{11Q,K}$	Veranderlijk C1-bijeenkomst	=	28,3	kN/m
$q_{12G,K}$	Vloerbelasting	=	40,8	kN/m
$q_{12Q,K}$	Veranderlijk C1-bijeenkomst	=	25,8	kN/m
$q_{13G,K}$	Vloerbelasting	=	58,7	kN/m
$q_{13Q,K}$	Veranderlijk C1-bijeenkomst	=	39,1	kN/m

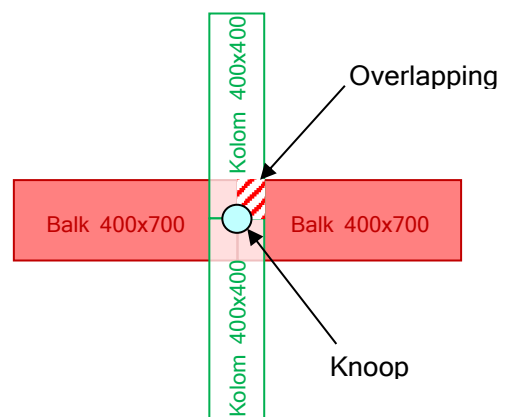
F-lasten:

$F_{1Q,K}$	Sneeuw	=	8,3	kN
$F_{2G,K}$	Eigen gewicht kolom	=	14,3	kN
$F_{3G,K}$	Eigen gewicht kolom	=	27,5	kN
$F_{4G,K}$	Eigen gewicht kolom	=	24,6	kN
$F_{5G,K}$	Eigen gewicht kolom	=	22,3	kN
$F_{6G,K}$	Reactie uit THQ-ligger	=	189,0	kN
$F_{6Q,K}$	Reactie uit THQ-ligger	=	53,0	kN
$F_{7G,K}$	Eigen gewicht kolom	=	12,0	kN
$F_{8G,K}$	Eigen gewicht kolom	=	23,0	kN
$F_{9G,K}$	Eigen gewicht kolom	=	20,7	kN
$F_{10G,K}$	Eigen gewicht kolom	=	18,8	kN
$F_{11G,K}$	Eigen gewicht kolom	=	16,0	kN
$F_{12G,K}$	Eigen gewicht kolom	=	30,8	kN
$F_{13G,K}$	Eigen gewicht kolom	=	27,6	kN
$F_{14G,K}$	Eigen gewicht kolom	=	25,0	kN
$F_{15G,K}$	Eigen gewicht kolom	=	1,5	kN
$F_{16G,K}$	Eigen gewicht kolom	=	17,4	kN
$F_{17G,K}$	Eigen gewicht kolom	=	33,5	kN
$F_{18G,K}$	Eigen gewicht kolom	=	30,0	kN
$F_{19G,K}$	Eigen gewicht kolom	=	27,2	kN
$F_{20G,K}$	Reactie uit THQ-ligger	=	146	kN
$F_{20Q,K}$	Reactie uit THQ-ligger	=	41,1	kN

Eigen gewicht:

Balken 700x400mm	=	7,00	kN/m
Stalen pet-ligger	=	0,93	kN/m

Het eigen gewicht van de liggers wordt via een extra q-last op de liggers aangebracht. Dit wordt gedaan vanwege het feit dat de functie in Technosoft voor automatische gewichtsberekening niet nauwkeurig is. De hartlijn van een profiel wordt namelijk als staaf ingevoerd in Technosoft. Wanneer het eigen gewicht door de software bepaald wordt, ontstaat er een probleem in de knopen. Dit is te zien in figuur 4.12. Het is te zien dat elementen elkaar overlappen ter plaatse van de knoop. Ter plaatse van de overlappings worden de eigen gewichten dubbel berekend. Vanwege dit feit is ervoor gekozen om de eigen gewichten er handmatig op te zetten.



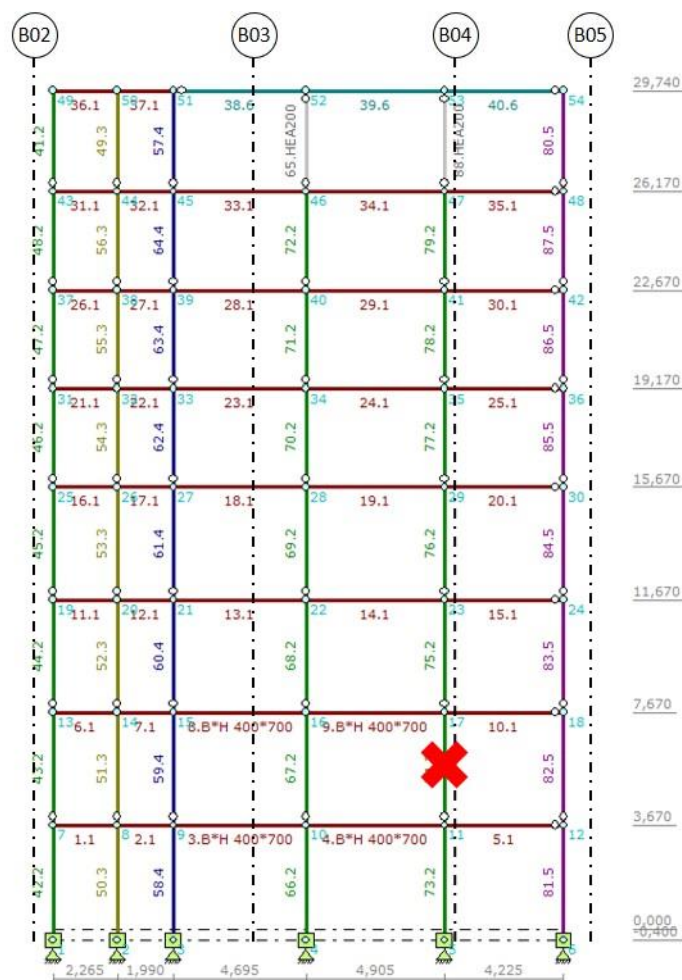
Figuur 4.12, knoop in Technosoft.

4.3. Calamiteitensituaties

Voor het onderzoek naar de tweede draagweg zijn er twee calamiteitensituaties onderzocht. De brandsituatie zorgt ervoor dat er op een verdieping twee kolommen bezwijken. Voor de berekening van de tweede draagweg bezwijkt er echter maar 1 kolom. Dit principe gebeurt op laag 1 en op laag 6. Door dit twee keer te doen kan er een beter beeld verkregen worden over hoe de belasting zich verdeelt. Voor de calamiteitensituatie wordt ervan uitgegaan dat alle omliggende constructieonderdelen een voldoende brandwerendheid hebben en al 90 minuten aan brand zijn blootgesteld.

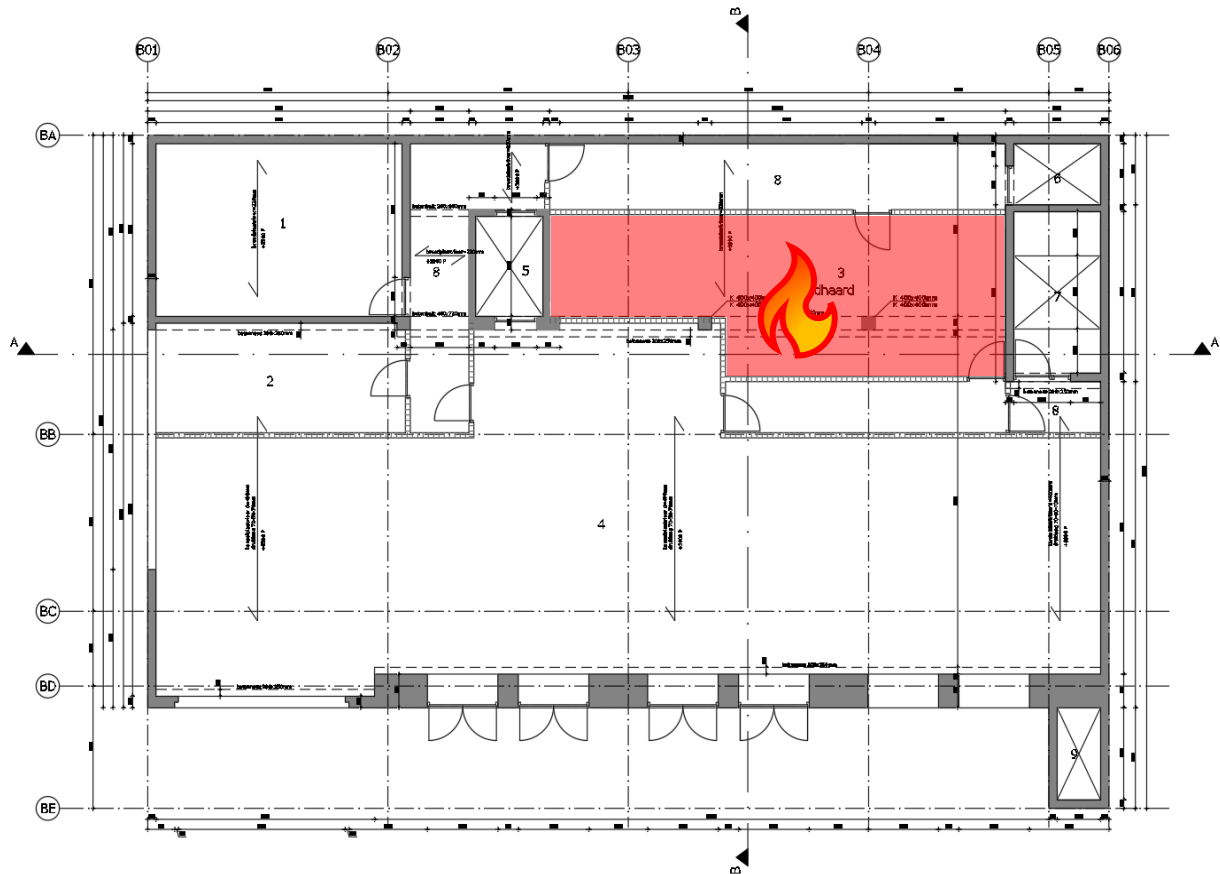
4.3.1. Calamiteitsituatie 1

In de eerste calamiteitsituatie bezwijkt er een kolom op laag 1. Deze kolom is in figuur 4.13 aangegeven met een rood kruis. In die kolom is relatief veel normaaldrukkracht aanwezig en weinig moment. De keuze voor deze kolom komt uit de plattegrond van de architect. Zo is er op de eerste verdieping een restaurant aanwezig met een bijbehorende keuken (figuur 4.14). Nu is de keuken een risicogebied voor het ontstaan van brand. Daarnaast is deze kolom samen met de



Figuur 4.13, calamiteitsituatie 1

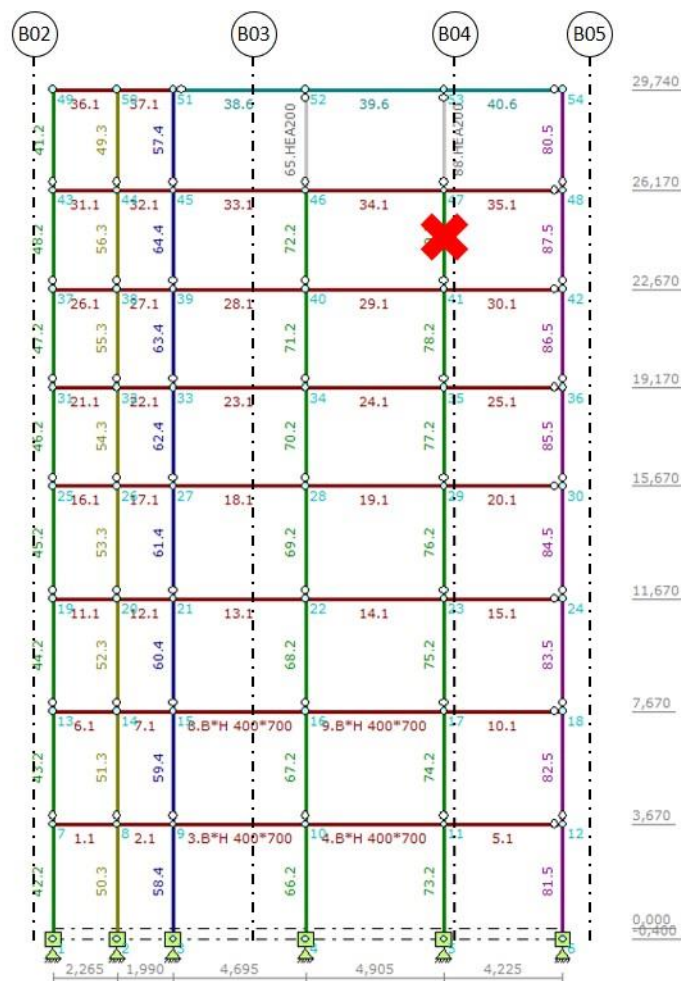
kolom uit het vierde stramien van links de enige kolommen zijn die niet gesteund is door een wand. De afmetingen van deze kolommen zijn ook kleiner dan de overige kolommen. Dat maakt deze kolommen maatgevend.



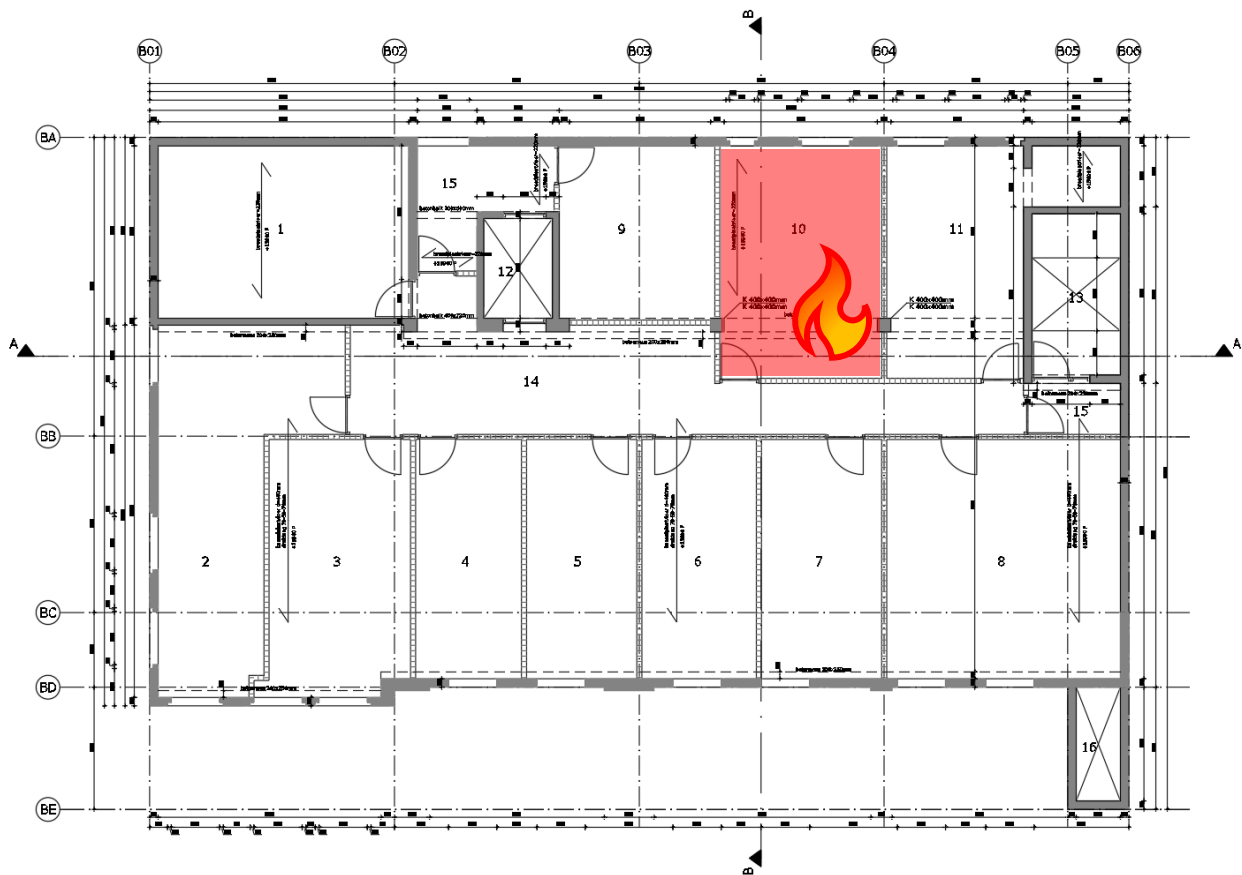
Figuur 4.14, plek van de brand in calamiteitsituatie 1 op de plattegrond van laag 1 aangegeven

4.3.2. Calamiteitsituatie 2

In de tweede calamiteitsituatie bezwijkt er een kolom op laag 6. Dat is in figuur 4.15 aangegeven met een rood kruis. De kolom die in calamiteitsituatie 2 bezwijkt, bevat een relatief groot moment en weinig normaaldrukkracht. Dat maakt de situatie verschillend van calamiteitsituatie 1. Daar is er veel normaaldrukkracht en weinig moment aanwezig. Vanuit de plattegronden van de architect is hier echter geen risicogebied zoals het geval is in calamiteitsituatie 1 (figuur 4.16). Op laag 6 bevinden zich alleen hotelkamers en ontsluitingswegen. Er is altijd kans op een brand, zoals kortsluiting door een televisie, maar het is een minder waarschijnlijk scenario dan de keuken op laag 1. Daarnaast is de situatie bovenin het raamwerk anders dan op laag 1, hierdoor kunnen beide situaties met elkaar vergeleken worden op het gebied van krachtswerking.



Figuur 4.15, calamiteitsituatie 2



Figuur 4.16, plek van de brand in calamiteitsituatie 2 op de plattegrond van laag 6 aangegeven

4.4. Maatregelen ten behoeve van de calamiteit

Het doel van dit onderzoek is om de constructie dusdanig robuust te maken, dat deze blijft staan wanneer er constructieve elementen bezwijken ten gevolge van brand. Het is op verschillende manieren mogelijk om dit doel te bereiken. Er is voor dit onderzoek besloten om te focussen op de volgende maatregelen:

- Wapenen van de calamiteit
- Dimensioneren op brand
- Tweede draagweg via schoren

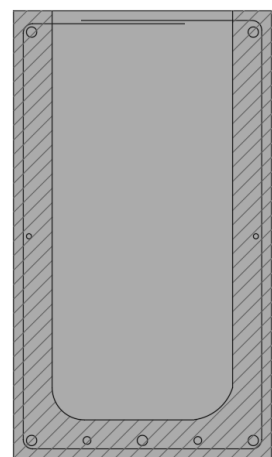
4.4.1. Wapenen van de calamiteit

Wanneer hier de mogelijkheid voor is kan er worden gewapend op de krachtswerking die plaatsvindt bij een calamiteitsituatie. Het zou kunnen dat er op bepaalde plekken in het raamwerk een moment optreedt dat in de uiterste grenstoestand nagenoeg gelijk is aan de calamiteitsituatie. Dan zou dat onder redundantie vallen. De constructie heeft dan in de uiterste grenstoestand nog genoeg capaciteit over om de calamiteitsituatie op te vangen.

Het is echter ook mogelijk dat de wapening uit de uiterste grenstoestand niet volledig in staat is om de nieuwe krachtswerking op te vangen. Wanneer dit binnen een bepaalde marge blijft zou het een oplossing kunnen zijn die ervoor zorgt dat de constructie robuust genoeg is. Het is echter ook mogelijk dat er een te grote krachtswerking optreedt door het bezwijken van elementen dat het niet mogelijk is om daarop te wapenen.

4.4.2. Dimensioneren op brand

Een andere oplossing voor het robuust maken van de constructie tegen brand, is het dimensioneren van de constructie op brand. Hierbij wordt de constructie niet uitgerekend met een van de in hoofdstuk 4.3 genoemde calamiteitsituaties. De constructie kan wel op andere manieren berekend worden. Deze zijn genoemd in de literatuurstudie naar rekenmethoden bij brand. Voor dit onderzoek wordt de constructie op laag 1 gedimensioneerd op brand via de 500°C-isothermmethode. De balk is gedimensioneerd op een brandwerendheid van 120 minuten. Er wordt ter controle een temperatuurmodel van de balk gemaakt om te kunnen beoordelen of dit ook een realistische berekeningsmethode is of dat er mogelijkheden zijn om scherper te kunnen rekenen. Het is niet van belang om veilig te rekenen in een onveilige situatie. In de literatuurstudie naar rekenmethoden tijdens brand is de 500°C-isothermmethode uitgelegd.



Figuur 4.17, voorbeeld van een gereduceerde doorsnede bij de 500°C-isothermmethode, het gearceerde deel is warmer geworden dan 500°C en vervalt dus in de doorsnede berekening

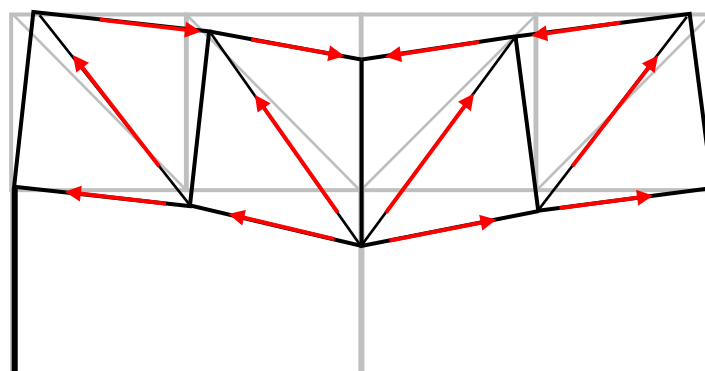
4.4.3. Tweede draagweg via schoren

Een alternatieve oplossing om de robuustheid te verbeteren is het aanbrengen van schoren in de constructie. De schoren die aangebracht worden nemen in de uiterste grenstoestand geen kracht op. Pas op het moment dat er een kolom bezwijkt, zullen de schoren gaan werken. Dat kan gerealiseerd worden door de schoren met speling aan te brengen. Op het moment dat een kolom bezwijkt zal een vervorming in de constructie ontstaan waardoor de schoren op spanning komen. De schoren zullen de constructie dan als het ware omhooghouden. Dit heeft te maken met het feit dat er aan de schoren getrokken zal worden. Het werkt daarmee hetzelfde als windbelasting die tegen een gebouw werkt. In die situatie zorgen de schoren ervoor dat het gebouw overeind blijft staan.

Met het oog op het einddoel van dit onderzoek is het van belang om te kijken naar een algemene oplossing. Het is daarbij niet het doel om specifiek voor calamiteitsituatie 1 of 2 een tweede draagweg te creëren. Daarom worden er meerdere oplossingen met schoren bekeken. Er worden in totaal drie varianten berekend:

1. Schoren in laag 7
2. Schoren in laag 6 & 7
3. Schoren in laag 3 & 7

De schoren zullen alleen trekkrachten opnemen. Wanneer er diagonalen op de onderste verdieping aangebracht zouden worden zullen de diagonalen alleen op druk belast worden. Dat is een situatie die niet gewenst is. Wanneer de schoren op een verdieping bovenin zitten, zullen deze op trek worden belast. Dat komt doordat de constructie naar beneden zal vervormen. De schoren willen dit tegenhouden vanwege de vormvastheid.

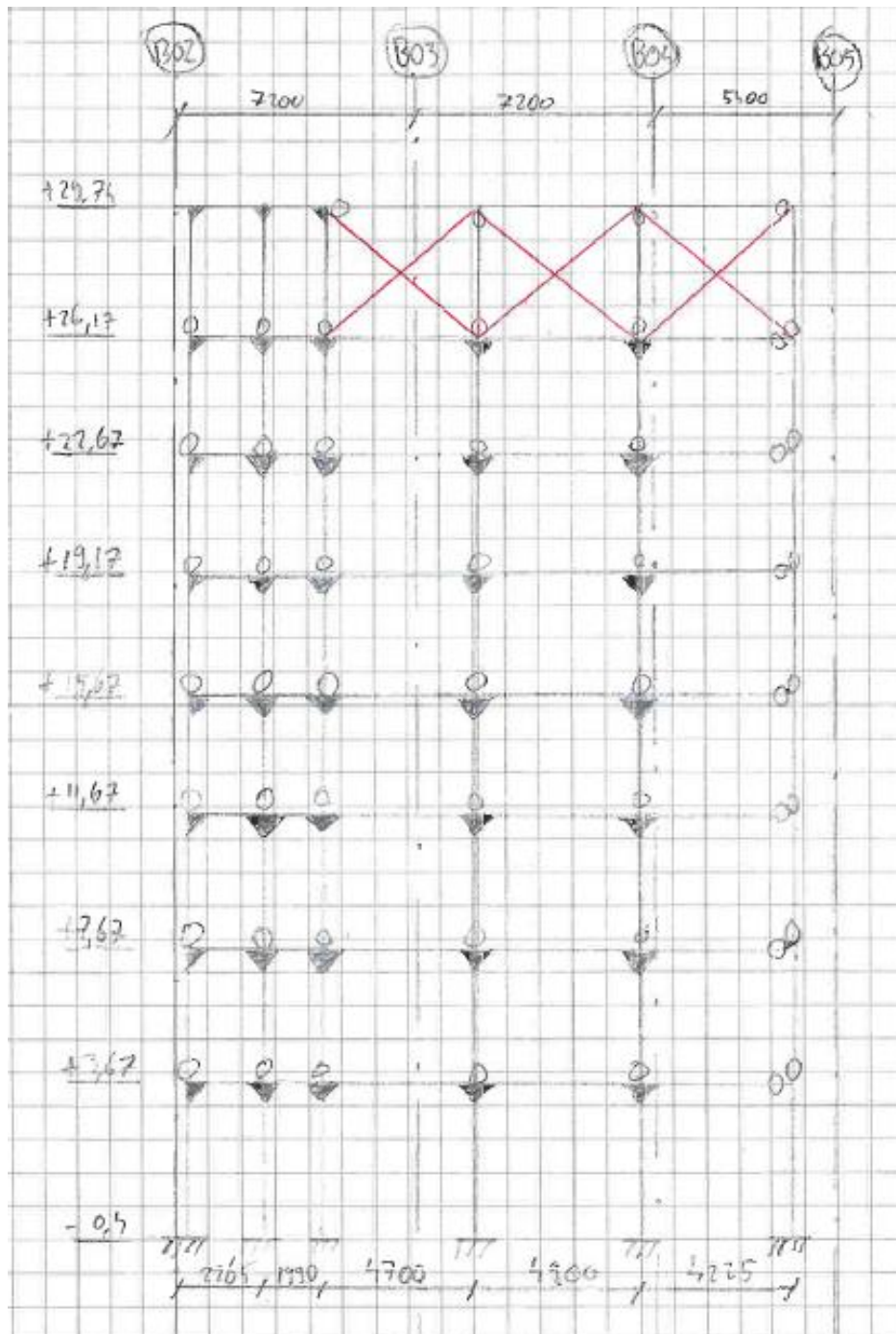


Figuur 4.18, werking van trekstaven wanneer er buiging ontstaat

Dat is te zien in figuur 4.18. Vanwege de vormvastheid van de driehoek die gecreëerd wordt door de diagonaal, zal een trekkracht ontstaan in de schoor. Deze tilt de ligger omhoog. Met deze gedachte in het achterhoofd is ervoor gekozen om in ieder geval schoren bovenin het raamwerk te plaatsen. Daardoor kan het raamwerk opgevangen worden op het moment dat een kolom bezwijkt.

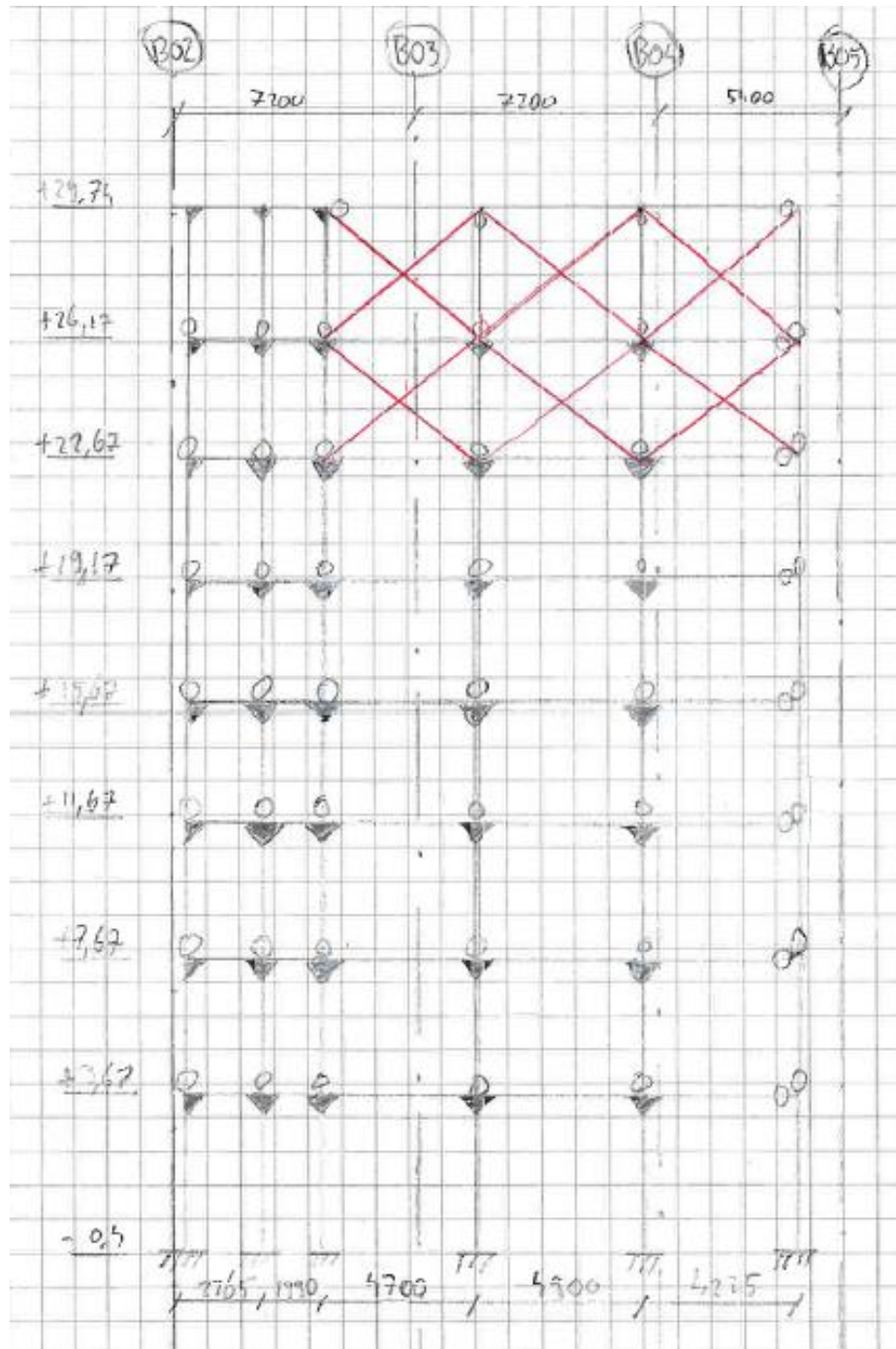
Er wordt ook bekeken op welke andere posities de schoren geplaatst kunnen worden. Er wordt bij deze situaties geen rekening gehouden met de indeling van de architect. Wat al eerder is toegepast in de praktijk is dat er een hangconstructie op de bovenste verdieping wordt gemaakt. Zo is er tijdens de ontwerpfase van een woongebouw in Rotterdam ook op de bovenste verdieping een hangconstructie ontworpen. Daardoor was de constructie in staat om een bezwijken kolom op de onderste verdieping op te vangen. Wanneer dat zou gebeuren, zou de constructie aan de hangconstructie gaan hangen (Tissink, 2005). Met deze informatie is gekozen schoren op de bovenste twee verdiepingen te plaatsen. Daarnaast is er ook een variant waarbij op een x aantal verdiepingen schoren aangebracht worden. X is een variabele invulwaarde. In het geval van de casus zouden dat laag 3 en laag 7 zijn. De schoren geven zo drie lagen bescherming. Op de volgende pagina's is in de schematisering aangegeven bij welke variant op welke plek de schoren aangebracht worden.

- Variant 1:



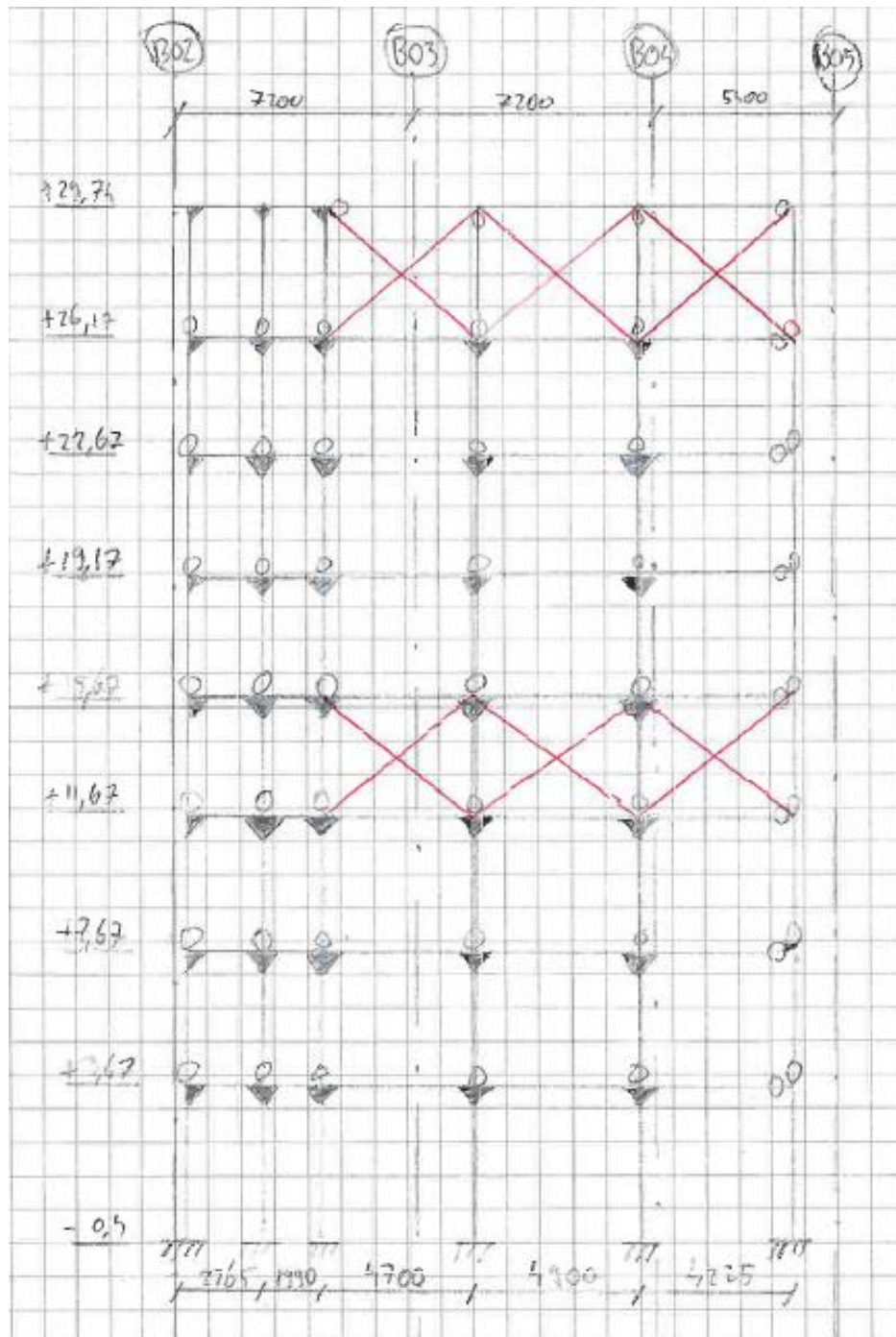
Figuur 4.19, schoren in het raamwerk voor variant 1

- Variant 2:



Figuur 4.20, schoren in het raamwerk voor variant 2

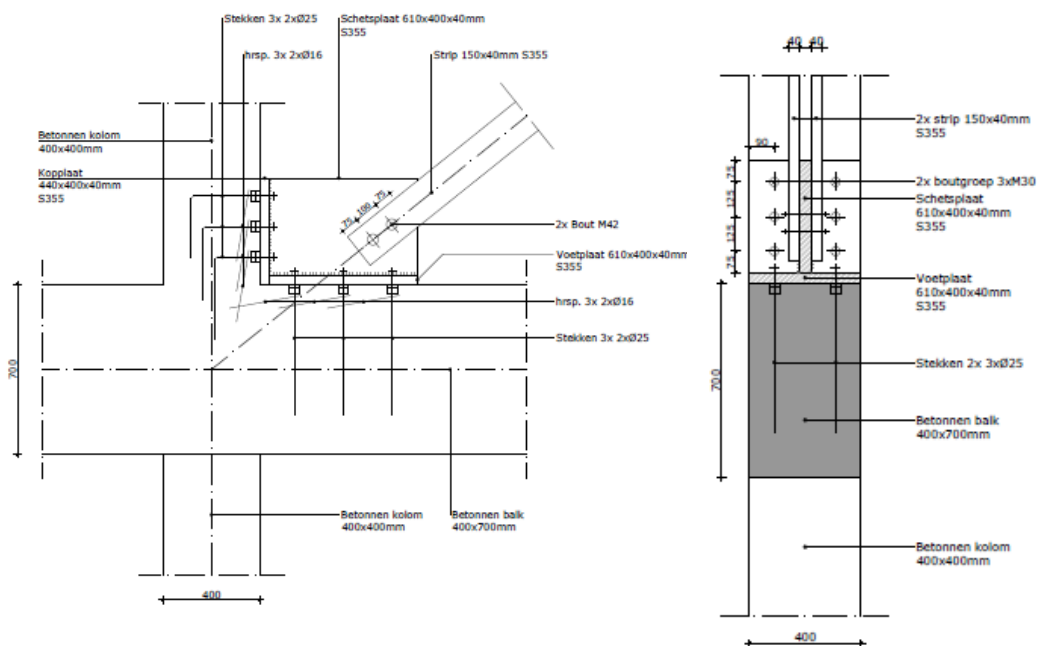
- Variant 3:



Figuur 4.21, schoren in het raamwerk voor variant 3

De schoren in alle raamwerken worden uitgevoerd met een strip van 150x40mm, met staalkwaliteit S355. De verwachting is dat het staal een grote trekkracht op moet nemen indien een van de calamiteitsituaties optreedt. De keuze voor een strip is gemaakt vanwege het feit dat de schoren echt alleen op trek worden belast. Daarnaast is een strip ook makkelijk te verwerken in het ontwerp. Een strip neemt relatief weinig ruimte in beslag en kan gemakkelijk geïntegreerd worden met bijvoorbeeld binnenwanden. Een strip is niet afdoende in staat om een drukkracht op te nemen. Dat komt omdat een strip om de zwakke as dusdanig knikgevoelig is dat deze al bij een geringe druk zal uitknikken. Wanneer er gekozen zou worden voor een hoekprofiel of een koker, zouden er eventueel staven op druk belast kunnen worden. Dat is in deze situatie niet de bedoeling. Vandaar dat er voor een strip gekozen is. Het is voor de tweede draagweg geen harde eis om altijd een strip te gebruiken. Deze ontwerpkeuze is gemaakt na overleg met Volantis.

Het lastige van deze optie is dat er een verbinding moet komen van een stabiliteitsverband op een betonnen constructie. Hieronder (figuur 4.22) is schematisch een principe getekend over hoe het staal aan de hoofd draagstructuur vast gemaakt kan worden. Deze verbinding wordt gemaakt met schetsplaten die aan de schoren vast zitten. De schetsplaten worden gelast aan kop- en voetplaten. De kop- en voetplaten worden door bouten en ankers aan het beton verbonden. Om de ankers zijn haarspelden aangebracht om de ankers op hun plek te houden. De berekening van de ankers zijn te vinden in bijlage D hoofdstuk 7.4. en de verbinding op schaal is uitgetekend in bijlage F03.



Figuur 4.22, schematische weergave van de schoorverbinding

5. Hoofdonderzoek

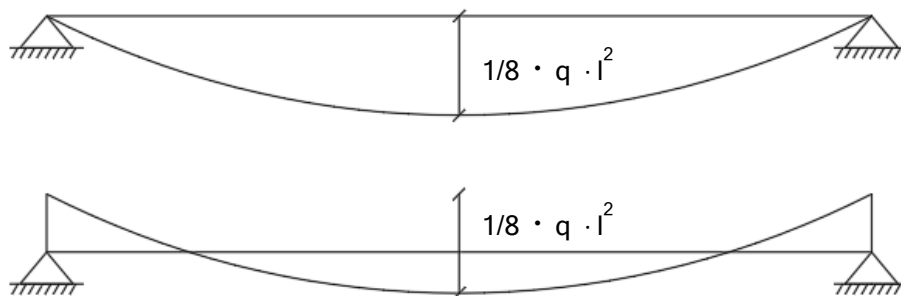
5.1. Resultaat en analyse uiterste grenstoestand

In bijlage D hoofdstuk 4.7. is de uitvoer van het raamwerk te vinden in de uiterste grenstoestand. De uitvoer bevat een momenten-, dwarskrachten- en normaalkrachtenlijn.

In de momentenlijn van het raamwerk in de uiterste grenstoestand is te zien dat de kolommen rechts van de liftschacht veel belasting naar zich toe trekken. Het steunpuntsmoment daar is in vergelijking met het steunpuntsmoment bij de kolommen groter. De kolommen bij de liftschacht zijn groter dan de overige kolommen. Dat veroorzaakt een verschil in stijfheid. De kolom bij de liftschacht is stijver dan de rest, waardoor deze meer belasting naar zich toe trekt. Alleen op de onderste twee verdiepingen is het steunpuntsmoment bij de liftschacht kleiner dan bij de overige kolommen. Dat heeft te maken met het feit dat er onderin de kolommen de normaalkracht dusdanig groot is geworden dat de indrukking ervoor zorgt dat de kolommen ernaast meer belasting opnemen. Daardoor zijn de momenten op laag 1 nagenoeg gelijk.

In het raamwerk is te zien dat bovenin het raamwerk voornamelijk de veldmomenten groot zijn en dat er onderin voornamelijk grote steunpuntsmomenten zijn. Het veldmoment onderin het raamwerk neemt af. Dat komt omdat binnen een statisch systeem de momentensom altijd $1/8ql^2$ is. Dat is te zien in figuur 5.1. Wanneer er een steunpuntsmoment is zal deze het veldmoment omhoogtrekken. Het veldmoment in een statisch systeem zoals in figuur 5.1 is dan nog maar $1/24 \times q \times l^2$.

De momenten in de kolommen zijn bovenin het raamwerk groter dan bovenin. Dat is logisch gezien het feit dat de normaalkracht bovenin het raamwerk kleiner is dan onderin. Normaaldrukkracht heeft een positief effect op het verminderen van het moment. Onderin een gebouw is er een hogere normaaldrukkracht aanwezig dan bovenin waardoor de momenten in de kolommen bovenin het raamwerk groter zijn.

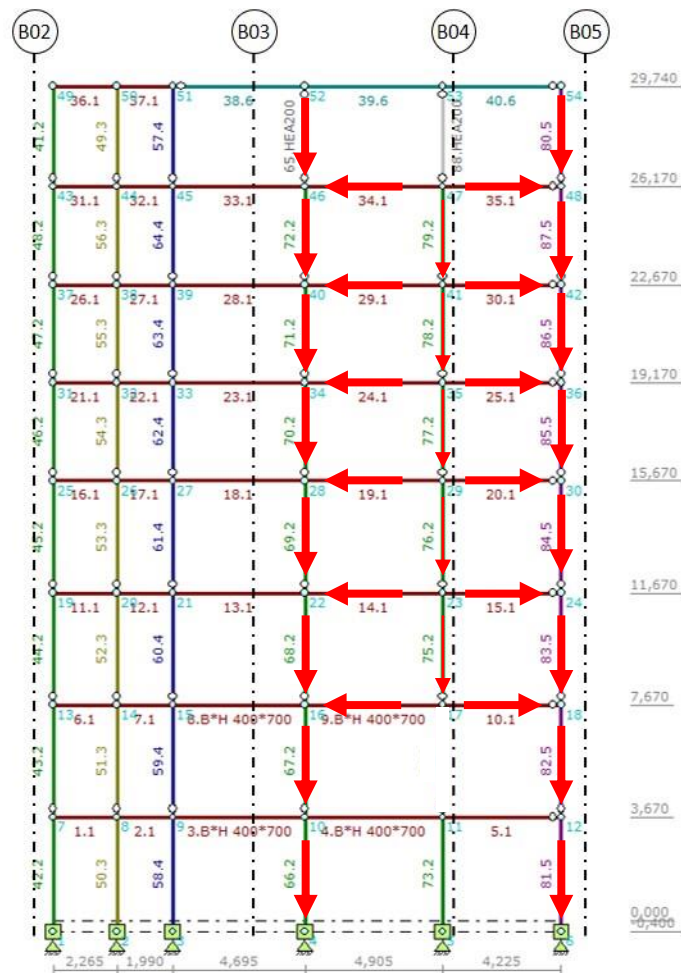


Figuur 5.1, bovenin de momentenlijn zonder steunpuntsmomenten en onderin de momentenlijn met steunpuntsmomenten

5.2. Hypothese calamiteitsituaties

5.2.1. Calamiteitsituatie 1

Wanneer de kolom op as 5 vanaf links bezwijkt, zullen de krachten die via die kolom liepen worden herverdeeld. Om te voorkomen dat er een instorting plaatsvindt via een herverdelings- of rits-instorting zal eerst de krachtsafdracht in het 'nieuw' ontstane raamwerk bepaald moeten worden. In figuur 5.2 is de te verwachten krachtsafdracht te zien voor calamiteitsituatie 1. Naar verwachting zal de kolom die zich nu boven de bezweken kolom bevindt, op trek worden belast. Deze kolom zal nu de aansluitende balken dragen. Hierdoor zal er geen bezwijking van de balk plaatsvinden. De krachten worden daarmee via een omleiding naar de fundering gebracht.



Figuur 5.2, krachtsafdracht voor de tweede draagweg in calamiteitsituatie 1

5.2.2. Calamiteitsituatie 2

In calamiteitsituatie 2 is het minder waarschijnlijk dat de verdiepingen boven de bezweken kolom als tuibrug werken. De kolom die erboven zit zal wel degelijk de balk omhoog willen houden, echter is het de vraag of de kolom en het dak daarvoor genoeg capaciteit hebben. Daarnaast zal er een groot moment ontstaan in de balk boven de bezweken kolom. De overspanning van de balk wordt namelijk twee keer zo groot. Verder zal er onder de bezweken kolom weinig veranderen. De normaalkracht in de kolommen eronder zal iets kleiner zijn dan in de uiterste grenstoestand, maar dat komt omdat deze kolommen geen belasting dragen van laag 7 en het dak. De krachten van die lagen zullen via de overige kolommen gedragen worden. Daarnaast is het verschil in stijfheden alleen geldig voor de kolom en de balk op laag 7. De lagen hieronder hebben daar geen last gezien het feit dat deze hetzelfde werken als in de uiterste grenstoestanden.



Figuur 5.3, krachtsafdracht voor de tweede draagweg in calamiteitsituatie 2

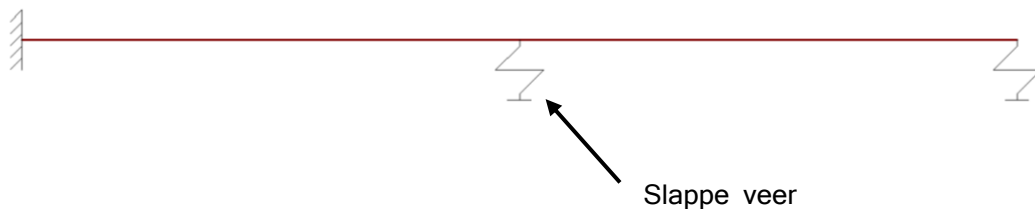
5.3. Resultaten en analyse calamiteitsituaties

De calamiteitsituaties zijn ingevoerd in Technosoft Raamwerken (versie 6). Deze raamwerken zijn doorgerekend en de uitvoer daarvan is te vinden in bijlage D hoofdstuk 5.1.

5.3.1. Calamiteitsituatie 1

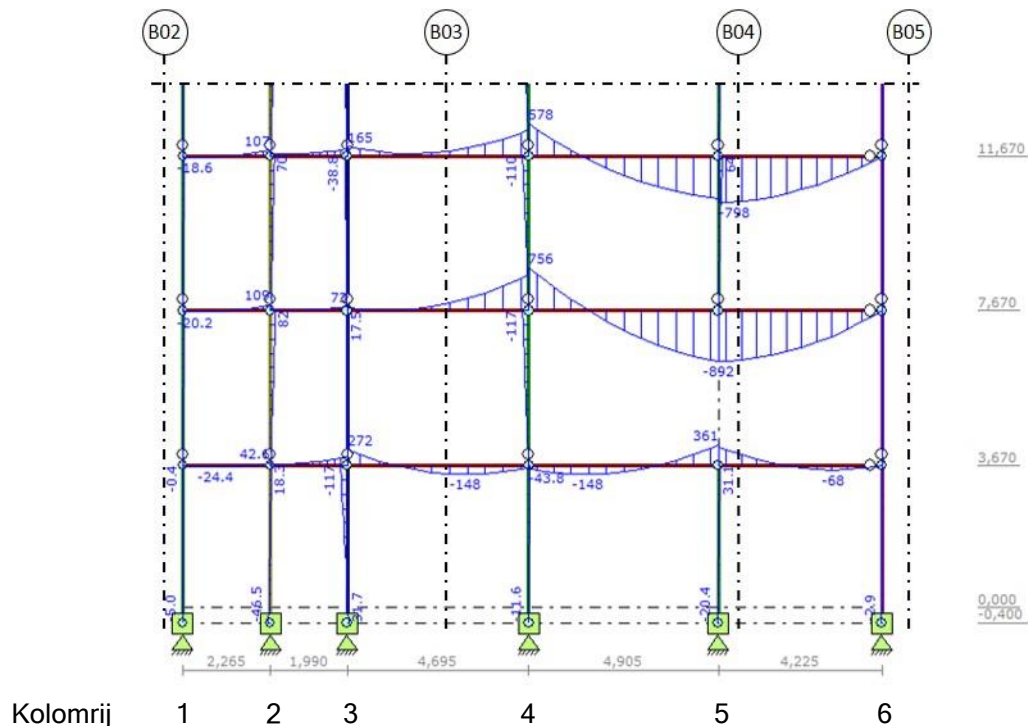
Als de uitvoer van Technosoft in calamiteitsituatie 1 bekeken wordt, vallen er een aantal zaken op. Zo valt op dat de kolommen die in hetzelfde stramien vallen als de bezweken kolom, kolomrij 5, bijna geen normaalkracht meer opnemen.

Dat heeft met het volgende te maken. De kolommen in kolomrij 5 zijn door de calamiteitsituatie minder stijf. Hierdoor gedraagt deze kolomrij zich voor de ligger als een slappe veer. Dit is schematisch weergegeven in figuur 5.4.

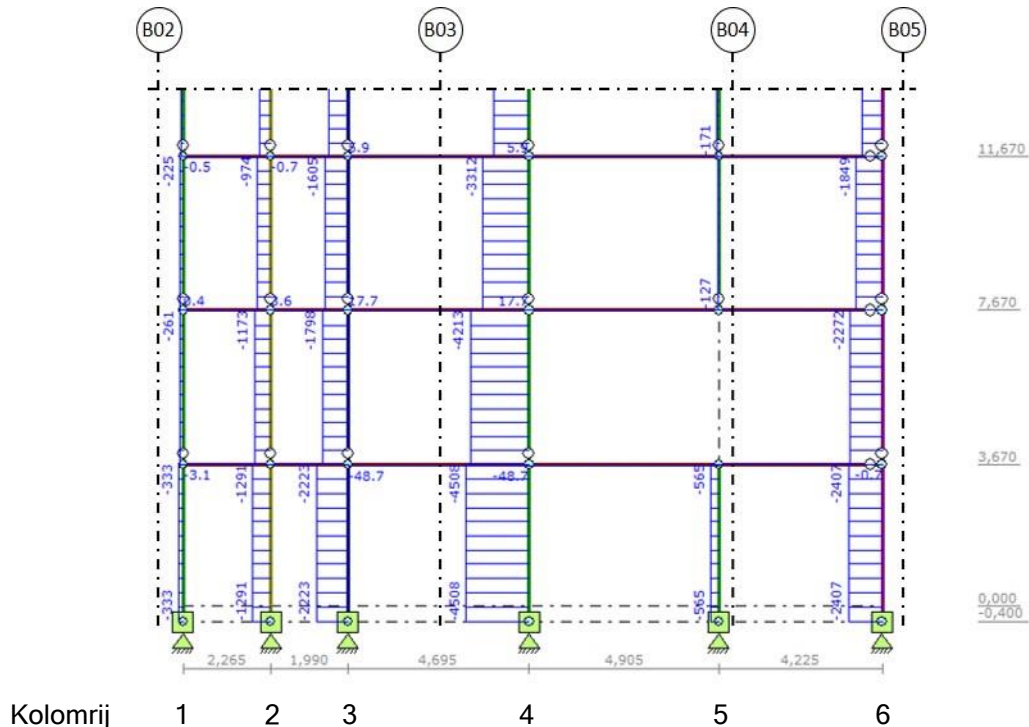


Figuur 5.4, schematisering van de opleggingen in het raamwerk tijdens calamiteitsituatie 1

Omdat de stijfheid van de kolommen in kolomrij 5 lager is dan de stijfheid van de balk, zal de balk meer belasting naar zich toe trekken. De balk geeft die belasting weer over aan de



Figuur 5.5, uitsnede van de M-lijn in Technosoft in calamiteitsituatie 1



Figuur 5.6, uitsnede van de N-lijn in Technosoft in calamiteitsituatie 1

aangrenzende kolom en wand. Dat is terug te zien in de verdeling van de normaalkracht. De kolommen in kolomrij 5, die lager in het raamwerk zitten, nemen minder belasting op. De kolom die zich recht boven de bezweken kolom bevindt, is zodanig slap dat deze van de kolommen in die rij (op de stalen kolom van laag 7 na) de minste normaalkracht van de kolommen in die rij tot zich neemt. De overige kolommen nemen wel normaalkracht op, maar in vergelijking met de aansluitende wand en kolom een stuk minder.

Voor de dichtstbijzijnde kolomrij naar binnen, in de casus kolomrij 4, neemt veel belasting over. Het linkerdeel van de constructie is namelijk stijver dan de wand in kolomrij 6. Hierdoor gaat er meer belasting naar de kolommen in kolomrij 4. Er loopt zelfs een grotere belasting via die kolom in calamiteitsituatie 1 dan in de uiterste grenstoestand (3907kN - 4508kN), terwijl de uiterste grenstoestand wordt berekend met de veiligheidsfactoren $\xi\gamma_G$ en γ_Q . Hier zou in de wapeningsberekening rekening mee gehouden moeten worden.

Een ander opvallende zaak in calamiteitsituatie 1 is dat er ter plaatse van de bezweken kolom onderin een groot positief moment aanwezig is. Deze is een stuk groter dan het moment in de uiterste grenstoestand (248kNm - 361kNm). Een mogelijke verklaring hiervoor is dat de kolom links van de bezweken kolom zo veel normaalkracht opvangt, dat deze extreem vervormt. Door de extreme vervorming zal de balk die daarop aangesloten is zich stijver gedragen dan de kolom die veel normaalkracht opvangt. Door deze stijfheidsverhouding zal de balk meer belasting naar zich toe trekken dan de kolom. Vandaaruit is het grote positieve moment te verklaren ter plaatse van de bezweken kolom. Bij de wapeningsberekening is dat een punt van aandacht.

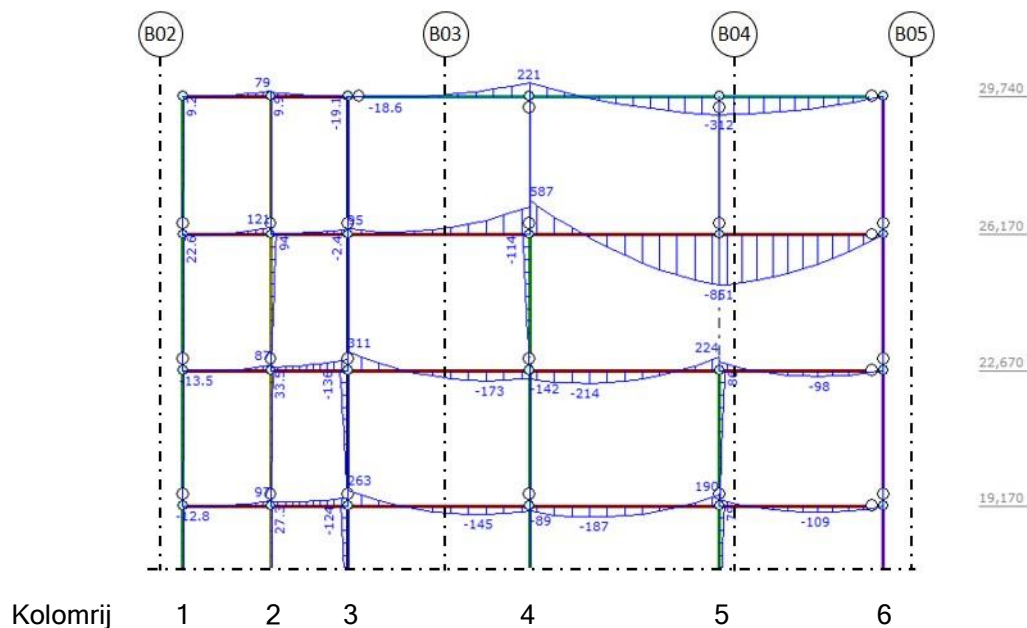
Verder is het moment in de balken boven de bezweken kolom extreem hoog in vergelijking met de uiterste grenstoestand. In bijlage D hoofdstuk 6.5. is er een wapeningsberekening opgenomen voor de balk in calamiteitsituatie 1. Wanneer deze berekening nader bekeken wordt, is te zien dat de huidige afmetingen niet volstaat. De benodigde wapening is groter dan er maximaal in mag ($A_{s,max}$).

De uitkomst van de berekening geeft hiermee aan dat in de huidige situatie de constructie zou bezwijken.

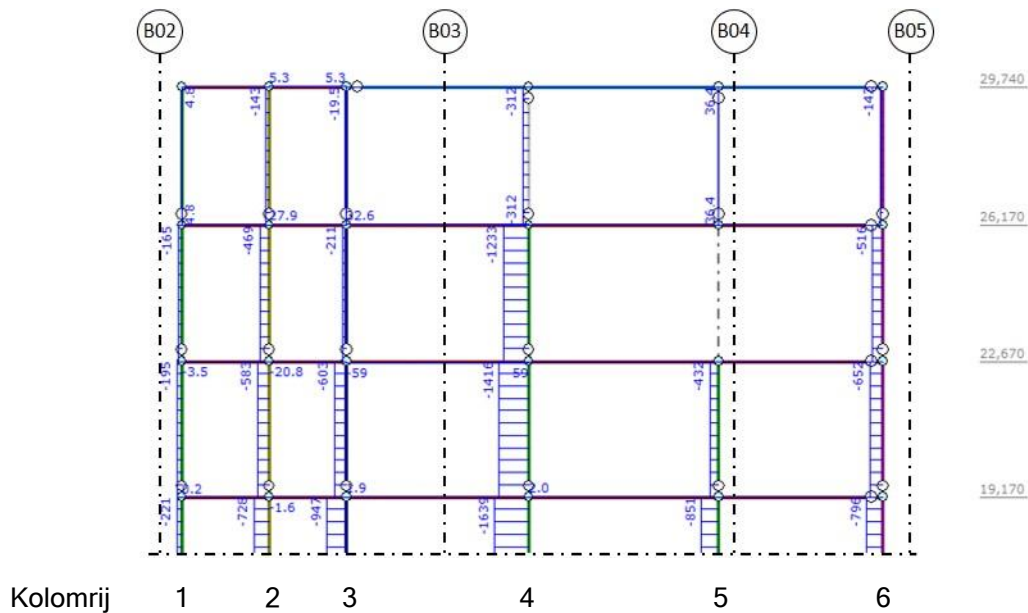
5.3.2. Calamiteitsituatie 2

Ook in calamiteitsituatie 2 vallen er een aantal zaken op. Zo is het moment in de balk ter plaatse van de bezweken kolom, zoals verwacht, groter dan in de uiterste grenstoestand (267kNm - 851kNm). In vergelijking met het grootste moment in calamiteitsituatie 1 is er geen groot verschil in het maximale moment (851kNm - 892kNm). Hierbij is er wederom een verschil in stijfheid dat ervoor zorgt dat de balk de belasting naar zich toe trekt en vervolgens de belasting afgeeft aan de aangrenzende wand en kolom. Hierdoor is er in de N-lijn te zien dat de normaalkracht in de kolom van laag 7 naar laag 6 in kolomrij 4 een flinke stijging ondergaat (921kN stijging). Ook trekt de balk door de stijfheidsverhouding een groot moment naar zich toe, waardoor er een groot steunpuntsmoment ontstaat in kolomrij 4.

Daarnaast is het moment in de dakligger ook toegenomen ten opzichte van de uiterste grenstoestand. Dit is hetzelfde effect als bij calamiteitsituatie 1. De kolom boven de bezweken kolom fungeert als een slappe veer en zal weinig belasting naar zich toe trekken. Dat is ook



Figuur 5.7, uitsnede van de M-lijn in Technosoft in calamiteitsituatie 2



Figuur 5.8, uitsnede van de N-lijn in Technosoft in calamiteitsituatie 2

zichtbaar in de N-lijn. Door de slappe veer ontstaat er een groot steunpuntsmoment ter plaatse van de kolom-ligger aansluiting in kolomrij 4 (64kNm - 221kNm).

De balken onder de bezweken kolom vertonen hetzelfde gedrag als de balk onder de bezweken kolom in calamiteitsituatie 1. Ter plekke van de knoop onder de bezweken kolom is een groot positief moment aanwezig. Dat heeft dezelfde oorzaak als de grote indrukking van de kolom in calamiteitsituatie 1. Dit effect herhaalt zich over de bouwlagen heen naar beneden. Daarbij zijn de steunpuntsmomenten in kolomrij 5 op de lagen 3 tot en met 6 groter dan in de uiterste grenstoestand. Hier dient rekening mee gehouden te worden in de berekening van de wapening. De steunpuntsmomenten in kolomrij 3 zijn niet hoger dan in de uiterste grenstoestand. Hier hoeft dan ook geen rekening mee gehouden te worden.

Calamiteitsituatie 2 vertoont veel overeenkomsten met calamiteitsituatie 1. Zo is er ter plekke van de bezweken kolom een groot moment aanwezig, zal een groot deel van de belasting boven de bezweken kolom overgedragen worden naar de aanliggende kolommen en is er recht onder de bezweken kolom een groot positief moment aanwezig. Op basis van deze bevindingen kunnen er voorspellingen gedaan worden over het moment dat er een andere kolom wegvalt.

5.4. Hypothese maatregelen

5.4.1. Wapenen van de calamiteit

De verwachting is dat het geen ideale oplossing zal zijn. Dit heeft ermee te maken dat de afmetingen al relatief slank zijn. Er moet al veel wapening in de constructie worden toegepast tijdens de uiterste grenstoestand. Dat zou kunnen betekenen dat de constructie al veel redundantie heeft. Wanneer een kolom bezwijkt zal de overspanning ongeveer twee keer zo groot worden. Het moment zal kwadratisch toenemen. Deze formule luidt namelijk dat bij een ligger op twee steunpunten: $M_{\max} = 1/8 \times q \times l^2$. Doordat de lengte twee keer zo groot wordt zal het moment twee keer de lengte in het kwadraat toenemen. Dit is gebaseerd op een ligger op twee steunpunten. In het raamwerk ligt dat anders. Dat komt omdat hier nog aangrenzende elementen aan de balk vast zitten.

De slanke afmetingen zouden ook een rol kunnen spelen bij de maximale hoeveelheid wapening. Wanneer er meer wapening zou moeten worden gebruikt dan de maximale wapeningshoeveelheid, zal de dimensie vergroot moeten worden. De vraag is of dit een rendabele oplossing is voor de calamiteitsituaties.

5.4.2. Dimensioneren op brand

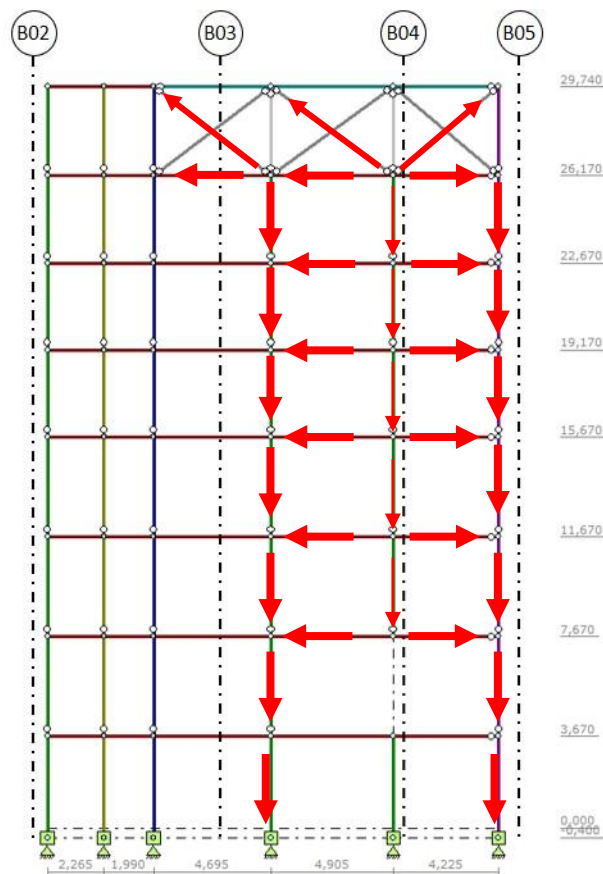
Dimensioneren op brand zou een goede oplossing kunnen zijn. In deze situatie bezwijkt geen kolom. De krachtswerking is ongeveer hetzelfde als in de uiterste grenstoestand. Het enige verschil is de grootte van de krachten. Deze krachten zijn kleiner dan in de uiterste grenstoestand. De blijvende belasting wordt in de bijzondere combinatie met één vermenigvuldigd. De variabele belasting wordt met de factor ψ_2 in plaats van γ_Q vermenigvuldigd. Dat zorgt ervoor dat er minder grote krachten in het raamwerk aanwezig zullen zijn. Dit is waarschijnlijk een gunstigere situatie dan wanneer er een kolom bezwijkt.

De vraag is alleen of de constructie het lang genoeg volhoudt om te voldoen aan de brandveiligheidseisen voor het Maanhotel. De constructie moet volgens de eisen 120 minuten aan brandwerendheid hebben. De temperatuur zal plaatselijk in de balk een hoge temperatuur kunnen bereiken. Dit is ongunstig vanwege het feit dat de dimensionering op brand in dit onderzoek zal uitgevoerd worden met de 500°C-isothermmethode. Dat betekent dat er op plaatsen waar het beton warmer is geweest dan 500°C, deze niet meer meegenomen mag worden in de betondoorsnede. De wapening mag wel in elke situatie (ook als deze in de 500°C-zone valt) meegenomen worden. Echter zal de sterkte van de wapening gereduceerd worden vanwege de temperatuur.

5.4.3. Tweede draagweg via schoren

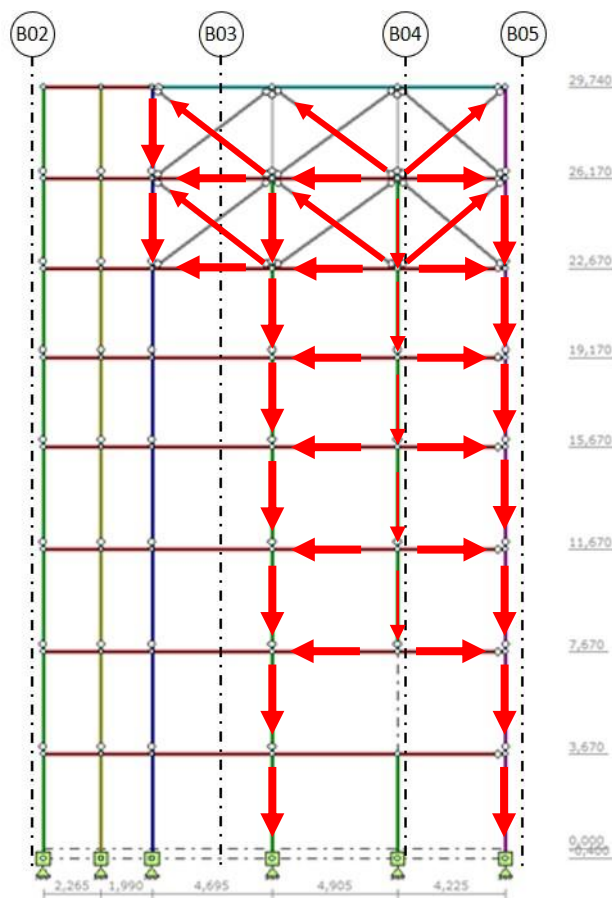
Verwacht wordt dat de tweede draagweg door middel van schoren goed zal werken. De schoren zorgen ervoor dat er een verdiepingshoge vakwerklijger ontstaat. Een van de kenmerken van een vakwerklijger is dat dit type ligter bij uitsluitend zuiver scharnierende verbindingen deze alleen normaalkracht oplevert. Dat is in dit raamwerk niet het geval. Er zullen in het raamwerk momenten optreden omdat deze hangconstructie geen zuivere vakwerklijger is.

Tussen de schoren varianten zal ook verschil zitten. Variant 1 zal in vergelijking met de andere twee varianten minder effectief zijn. Dat komt omdat er simpelweg minder schoren aanwezig zijn. Hierdoor is de constructie minder stijf dan de overige twee. Voor calamiteitsituatie 2 zullen de schoren in laag 7 zeker meerwaarde hebben. De schoren liggen dicht bij de bezwijken kolom waardoor de krachten via een korte weg opgevangen worden. Bij calamiteitsituatie 1 is het twijfelachtig of de schoren veel winst opleveren. Wanneer dat winst oplevert maar niet genoeg, dan zou variant 2 een alternatief kunnen zijn.



Figuur 5.9, te verwachten krachtafdracht voor de tweede draagweg in calamiteitsituatie 1 voor schoren variant 1

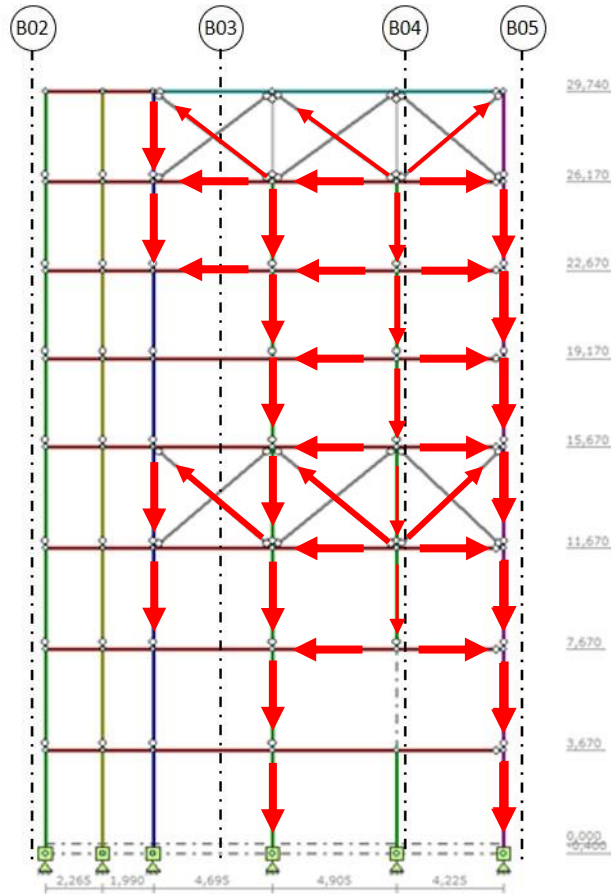
Variant 2 zal hetzelfde constructieve gedrag vertonen als variant 1. Nu zal de normaaltrekkraft in de schoren beter verdeeld zijn ten opzichte van variant 1. Dat is voor calamiteitsituatie 2 ideaal. Er is dan een hangconstructie aanwezig op de plek van de calamiteit. Hierdoor zal het effect van een bezwijken kolom nihil zijn. Voor deze laag zou variant 2 een prima oplossing zijn. Het is wel de vraag of variant 2 voldoende capaciteit heeft om calamiteitsituatie 1 op te vangen. De bezwijken kolom uit calamiteitsituatie 1 ligt verder van de hangconstructie af dan in calamiteitsituatie 2. Dit zou een negatief effect kunnen hebben op de momenten van het raamwerk.



Figuur 5.10, te verwachten krachtsafdracht voor de tweede draagweg in calamiteitsituatie 1 voor schoren variant 2

Daarmee zou variant 3 weer een positief resultaat kunnen opleveren. In variant 3 liggen er schoren vlakbij de bezwijken kolom uit calamiteitsituatie 1. De schoren op laag 7 zullen in deze situatie waarschijnlijk normaalkracht opnemen. Voor de verdeling van de normaalkracht zal er wellicht niet een even groot verschil zijn als in variant 2. De verdeling van de momenten zou wel verschillend kunnen zijn. De vervorming in variant 3 zou tegengehouden kunnen worden vanwege de schoren die dichtbij de bezwijken kolom staan uit calamiteitsituatie 1. Dit zou dan ook betekenen dat er een minder groot moment is in variant 3 dan in variant 2. Dit is een gunstig effect. Daarmee is de aanname dat voor calamiteitsituatie 1 variant 3 het beste zal werken en dat

voor calamiteitsituatie 2 variant 2 de effectiefste oplossing is. Wanneer er gekeken wordt naar een willekeurige bezweken kolom zal variant 3 wellicht de beste optie zijn.



Figuur 5.11, te verwachten krachtsafdracht voor de tweede draagweg in calamiteitsituatie 1 voor schoren variant 3

5.5. Resultaten en analyse maatregelen

5.5.1. Wapenen van de calamiteit

De berekeningen voor het wapenen van de calamiteit zijn te vinden in bijlage D hoofdstuk 6. De krachten uit de wapeningsberekeningen zijn gehaald uit de raamwerkberekeningen van calamiteitsituaties 1 en 2.

In de wapeningsberekeningen voor calamiteitsituatie 1 en 2 zijn er een aantal zaken te zien. In hoofdstuk 5.3 was al te zien dat er ter plekke van de bezwaken kolom in beide situaties een groot buigend moment ontstaat. Deze zou dan door extra wapening opgevangen moeten worden in deze calamiteitsoplossing.

Om het veldmoment in beide situaties op te vangen moet er veel meer oppervlakte aan staal in de betondoorsnede. In calamiteitsituatie 1 zou meer wapening in de betondoorsnede geplaatst moeten worden dan maximaal is toegestaan. Er zou 3478mm^2 staal nodig zijn, terwijl de maximale toegestane hoeveelheid staal ($A_{s,\text{max}}$) 3321mm^2 is. De maximale toegestane wapening in de doorsnede is vastgelegd in NEN-EN 1992-1-1 NB artikel 9.2.1.1. Hierbij overschrijdt calamiteitsituatie 1 met 157mm^2 de maximale wapeningshoeveelheid. Een oplossing hiervoor is het vergroten van de doorsnede. Echter is het de vraag of dit een verstandige oplossing is. Wanneer de dimensies van de balk vergroot worden, zal er nog steeds meer wapening nodig zijn dan in de uiterste grenstoestand. Dan zou de balk tot ongeveer $A_{s,\text{max}}$ aan wapening bevatten. Dat kost dat in eerste instantie veel arbeid om dat te maken. Daarnaast zullen er veel kilo's aan extra staal ingekocht moeten worden. Daarmee zou de prijs van de constructie onnodig hoog worden terwijl er dan overbodig veel extra staal in de constructie zit die in de uiterste grenstoestand niet essentieel is. Ook vanuit een duurzaamheidsoogpunt is dit geen gewenste oplossing. Een andere oplossing zou zijn om de betonsterkteklasse aan te passen. De doorsnede zou dan meer druk aan kunnen wat tot minder wapening leidt. Ook zou er bijvoorbeeld drukwapening toegepast kunnen worden. Echter zijn dit dure oplossingen.

In calamiteitsituatie 2 is de benodigde wapeningshoeveelheid kleiner dan de maximale wapeningshoeveelheid ($3308\text{mm}^2 < 3321\text{mm}^2$). Toch zit deze hoeveelheid dichtbij de maximale wapeningshoeveelheid. Vanwege dit geringe verschil is het niet mogelijk om binnen deze marge te wapenen. Wanneer er gekeken wordt naar de mogelijkheden om hierop te wapenen zal er of te weinig wapening aanwezig zijn, of juist meer dan toegestaan. Daarmee is het in beide situaties niet mogelijk om de constructie in het veld op te vangen met extra wapening. In dit geval zou de gehele constructie daarmee bezwijken.

De steunpuntsmomenten binnen beide calamiteitsituaties zijn wel op te vangen met extra wapening. Deze hoeveelheden vallen daarbij binnen de marges van de maximale

wapeningsverhouding. Zo is er in calamiteitsituatie 1 2808mm^2 wapening nodig en in calamiteitsituatie 2, 2039mm^2 .

Echter is deze wapeningshoeveelheid een stuk groter in beide situaties dan in de uiterste grenstoestand. Zo is in calamiteitsituatie 1 2050mm^2 meer wapening aanwezig dan in de uiterste grenstoestand ($758\text{mm}^2 - 2808\text{mm}^2$). In calamiteitsituatie 2 is dat 1804mm^2 meer wapening ($235\text{mm}^2 - 2039\text{mm}^2$).

Aangezien er zoveel overschot aanwezig is ten opzichte van de uiterste grenstoestand is dit vanuit duurzaamheid en economische redenen geen goed idee.

5.5.2. Dimensioneren op brand

Voor de dimensionering op brand zijn berekeningen gemaakt. Deze zijn terug te vinden in bijlage D hoofdstuk 6. De krachten uit deze berekeningen zijn uit het raamwerkmodel zonder calamiteitsituatie gehaald. Echter is het raamwerk wel voor deze methode berekend in de bijzondere combinatie. De uitvoer hiervan is te vinden in bijlage D hoofdstuk 4.7.

De krachtswerking in de bijzondere combinatie verschilt weinig ten opzichte van de uiterste grenstoestand. De belastinggevallen en het raamwerk zijn in beide situaties hetzelfde. Alleen de belastingcombinaties zijn anders. Dat betekent dat de waardes van de momenten, dwarskrachten en normaalkrachten lager uitvallen dan in de uiterste grenstoestand. De verdeling van deze krachten staat echter in dezelfde verhouding als in de uiterste grenstoestand. In hoofdstuk 5.6.2. wordt er dieper ingegaan op de wapeningsberekeningen die voor deze maatregel gemaakt zijn.

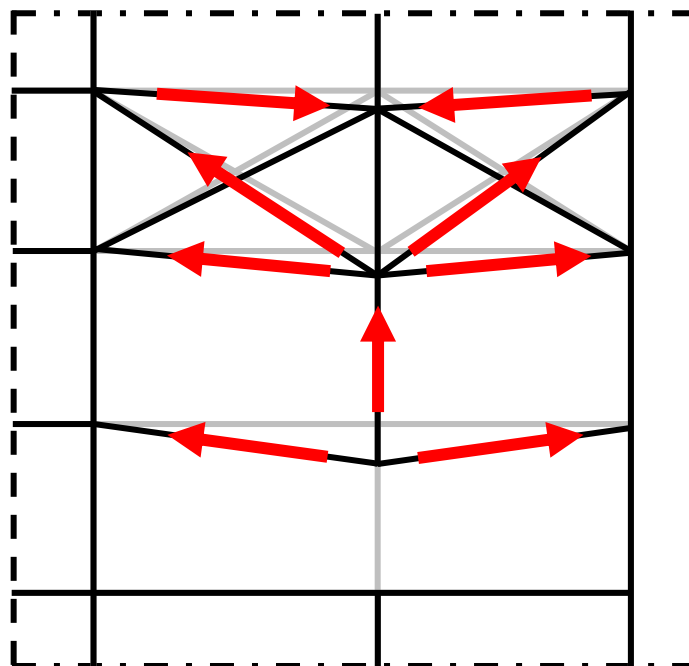
5.5.3. Tweede draagweg via schoren

Van alle varianten zijn raamwerkmodellen gemaakt en doorgerekend in de bijzondere combinatie. Deze zijn te vinden in bijlage D hoofdstuk 5.2.

Er vallen een aantal zaken te zien in de uitvoer van alle varianten met schoren. Zo is te zien dat in calamiteitsituatie 1 voor variant 1 de momenten-lijn hetzelfde gedrag vertoont als de momenten-lijn van calamiteitsituatie 1 zonder voorzieningen. Alleen zijn de momenten en de normaalkrachten kleiner. Dat is te danken aan de schoren waaraan getrokken wordt. Die kunnen deze krachten omzetten in normaaltrekrachten. Daarmee wordt de normaalkracht via een andere route geleid dan in calamiteitsituatie 1. De overige verschijnselen van calamiteitsituatie 1 komen ook voor tijdens de schoren van variant 1. De kolomrij boven de bezwijken kolom zal zich gedragen als een slappe veer, waardoor deze weinig kracht naar zich toe zal trekken. De kolomrijen ernaast zullen wederom vanwege een stijfheidsverhouding meer belasting naar zich toe trekken. Ook het grote steunpuntsmoment aan de onderkant ter plaatse van de bezwijken kolom is groter dan in de uiterste grenstoestand. De balken bovenin het raamwerk worden op druk belast. Dat is te verklaren aan de hand van figuur 4.18. Daar is goed te zien dat zodra de schoren werken er een

drukkracht in de balk ontstaat. Hier dient rekening mee gehouden te worden met het bepalen van de wapening.

Variant 2 verschilt niet veel van variant 1. Het verloop van de momentenlijn is nagenoeg hetzelfde. In variant 2 zijn de momenten kleiner. Dat komt omdat er meer materiaal aan schoren aanwezig is. Daardoor heeft de constructie meer capaciteit. De kolommen boven de bezwijken kolom bevatten in deze situatie trek. De schoorconstructie bovenin zorgt ervoor dat de kolommen omhooggetild worden. Zonder schoren zouden deze door zwaartekracht naar beneden vallen. De schoren houden dat tegen waardoor een trekkracht ontstaat in de kolommen.



Figuur 5.12, de schoorconstructie houdt de kolom boven de bezwijken kolom omhoog

In variant 3 vertoont de momentenlijn veel overeenkomsten met die van de uiterste grenstoestand. Alleen de balk bij de bezwijken kolom vertoont hetzelfde gedrag zoals tijdens de andere calamiteitsituaties. Hierbij zijn de momenten kleiner. Daarbij vertoont het gebied rondom de bezwijken kolom hetzelfde gedrag. Wanneer er naar boven gekeken wordt valt iets anders te zien. De kolommen boven de schoren in laag 3 nemen nu druk op. De kolomrij hier is nog steeds relatief slap gezien het feit dat de naastgelegen kolommen/wanden meer belasting naar zich toe trekken. Echter gedraagt deze zich wel stijver dan de kolommen in calamiteitsituatie 1. Daarbij gaat er nauwelijks belasting naar die kolommen terwijl in deze situatie de belasting wel via de kolommen boven de bezwijken kolom verloopt. Dat geldt ook voor de kolommen boven de schoren in laag 3. De kolom boven de bezwijken kolom krijgt wel trek te verduren. Dat is hetzelfde principe als bij variant 1 en 2 voor alle kolommen boven de bezwijken kolom. Doordat in variant 3 de calamiteit dicht bij een schoorconstructie zit, wordt dat effect ingeperkt. Dat heeft

daarmee een gunstige werking op de momentenlijn. Daardoor bevindt zich in de kolommen boven de schoorconstructie een normale situatie waarbij een positief moment aanwezig is in het steunpunt. Het steunpuntsmoment zal het veldmoment ook verkleinen wat weer betekent dat minder wapening in het veld benodigd is. Dat is een gunstige situatie.

In hoofdstuk 5.6.2 zal er een vergelijking tussen de wapeningshoeveelheden plaatsvinden.

5.6. Vergelijking maatregelen

5.6.1. Krachtswerking

	Maximaal M_{veld} (kNm)	Maximaal M_{steun} (kNm)	Maximaal V_{steun} (kN)	Maximaal N_{Ed} (kN)
Uiterste grenstoestand	267	334	338	30,7
Bijzondere combinatie	188	231	221	22,5
Calamiteitsituatie 1	892	361	553	32,6
Calamiteitsituatie 2	851	587	467	59
Schoren in calamiteitsituatie 1 variant 1	470	515	409	1497
Schoren in calamiteitsituatie 1 variant 2	388	459	375	1155
Schoren in calamiteitsituatie 1 variant 3	276	346	317	1047
Schoren in calamiteitsituatie 2 variant 1	127	148	179	789
Schoren in calamiteitsituatie 2 variant 2	127	211	188	722
Schoren in calamiteitsituatie 2 variant 3	124	179	202	753

Tabel 5.1, alle krachten in de balken bij de verschillende situaties.

In tabel 5.1 zijn de maximale waardes uit de verschillende raamwerkmodellen te vinden.

Wat opvalt in de tabel is dat er nogal wat verschillen zitten tussen de momenten en de krachten. Deze verschillen zijn in veel gevallen logisch te verklaren. Zo zijn er ook al een aantal verschillen beschreven in de vorige hoofdstukken.

In het komende hoofdstuk wordt ook de vergelijking gemaakt met de wapeningshoeveelheden. In deze tabel valt vooral de krachtswerking in calamiteitsituatie 1 met schoren op. De varianten met schoren in calamiteitsituatie 2 geeft geen grote verschillen tussen elkaar. Er zit alleen een verschil in het steunpuntsmoment. De overige verschillen zijn verwaarloosbaar. Dat heeft ermee te maken dat ze allemaal alleen de schoren uit laag 7 gebruiken om aan te 'hangen'. In variant 2 en 3 hebben de overige schoren in het raamwerk nagenoeg geen bijdrage. Hierdoor verschilt de krachtswerking minimaal. In calamiteitsituatie 1 is dat een ander verhaal. Aangezien hier de calamiteit ver van het dak af staat, is hier wel een groot verschil in de krachtswerking. Zo is het maximale veldmoment in variant 1 1,7 keer zo groot als in variant 3. Dat is een aanzienlijk verschil. Het maximale veldmoment in variant 2 is 1,4 keer zo groot als in variant 3. Ook zitten er

forse verschillen tussen de steunpuntsmomenten. Hier zijn de verschillen iets minder groot dan bij het veldmoment, maar deze zijn niet verwaarloosbaar. Ook de normaalkracht in de balken geeft flinke verschillen tussen variant 1 en 2/3. Dit verschil wordt gemaakt vanwege het feit dat er minder schoren aanwezig zijn. Hierdoor worden alle krachten rondom die schoren verspreid. In variant 2 en 3 is dit beter verdeeld. In de dwarskrachten zijn geen grote verschillen te vinden.

	Maximaal M_{steun} (kNm)	Maximaal V_{steun} (kN)	Maximaal N_{Ed} (kN)
Uiterste grenstoestand	143	41	3976
Bijzondere combinatie	102	29,3	2972
Calamiteitsituatie 1	117	32,6	4508
Calamiteitsituatie 2	124	32,6	3089
Schoren in calamiteitsituatie 1 variant 1	132	19,4	3343
Schoren in calamiteitsituatie 1 variant 2	177	13,6	3070
Schoren in calamiteitsituatie 1 variant 3	132	36	3104
Schoren in calamiteitsituatie 2 variant 1	146	40,8	2535
Schoren in calamiteitsituatie 2 variant 2	157	44	2423
Schoren in calamiteitsituatie 2 variant 3	138	34,7	2276

Tabel 5.2, alle krachten in de kolom bij de verschillende situaties.

Ook is gekeken naar de krachtwerving in de kolommen per situatie. Dat is te vinden in tabel 5.2. Ook zijn hier een aantal zaken verschillend. Echter zijn deze verschillen minder groot dan bij de balken. Wanneer er gekeken wordt naar de verschillen in de calamiteitsituatie ten opzichte van de uiterste grenstoestand zijn de normaalkrachten lager in alle varianten met schoren dan in de uiterste grenstoestanden. De grootte van de momenten verschillen per situatie in vergelijking met de uiterste grenstoestand

Het heeft geen zin om de resultaten van de calamiteitensituaties op zichzelfstaand te bekijken, aangezien uit de berekening van de balken al naar voren is gekomen dat extra wapening bijleggen geen optie is. Zo is te zien dat er in calamiteitsituatie 1 een grote normaaldrukkracht aanwezig is, maar daar wordt dan ook niet meer op getoetst.

Verder zijn de onderlinge verschillen tussen de varianten met schoren vrij klein. Daarnaast zijn alle normaalkrachten in de situaties met schoren lager dan in de uiterste grenstoestand. Ook de momenten in de kolom zijn vergelijkbaar met de uiterste grenstoestand. Bij de kolommen wordt daarom niet het verschil gemaakt per situatie. Het is verstandiger om een besluit te nemen op basis van de krachtswerking in de balken.

	Maximaal $N_{Ed,fi}$ (kN)
Schoren in calamiteitsituatie 1 variant 1	1960
Schoren in calamiteitsituatie 1 variant 2	1322
Schoren in calamiteitsituatie 1 variant 3	1441
Schoren in calamiteitsituatie 2 variant 1	1032
Schoren in calamiteitsituatie 2 variant 2	945
Schoren in calamiteitsituatie 2 variant 3	986

Tabel 5.3, krachten in de schoren

Als laatste is in tabel 5.3 de maximale normaalkracht in de schoren bepaald per variant. De maximale normaalkracht verschilt per calamiteitsituatie. Hier is calamiteitssituatie 1 wederom maatgevend. Hierin zijn grote verschillen te zien. Variant 1 heeft de grootste normaaltrekkkracht. Deze is ongeveer 1,5 keer zo groot als de maatgevende diagonaal uit variant 2. Dit is wederom te verklaren door het feit dat er in variant 1 minder oppervlak aan schoren aanwezig is. De normaaltrekkkracht in variant 3 is hoger dan in variant 2, dit moet zeker meegenomen worden in de berekening van de schoor en de verbinding ervan. Het verschil tussen deze twee is niet enorm groot, maar mag niet verwaarloosd worden.

Een ander punt van aandacht bij de krachten in de schoren is de verbinding ervan aan de hoofddraagstructuur. In calamiteitsituatie 1 zal de verbinding een kracht van 1322kN overbrengen. Dit is een forse kracht die niet zomaar verbonden wordt. In bijlage D hoofdstuk 7 is een berekening gemaakt voor de verbinding van de schoren. Voor alle varianten in calamiteitsituatie 1 zijn de verbindingen uitgerekend. Hierbij valt op dat alle varianten dezelfde verbinding nodig hebben. De verbinding bestaat dan uit twee bouten van M42. In de bouw is een bout M42 geen gebruikelijke optie. Dat is een forse verbinding, maar niet onrealistisch wanneer er grotere krachten dan 1000kN opgevangen moeten worden. Kleinere bouten dan M42 kunnen niet gebruikt

worden voor dit type verbinding. Wanneer er gekeken wordt naar de mogelijkheden met M36, zal de verbinding op afschuifweerstand niet voldoen.

5.6.2. Wapening

	Veld- wapening	Steunpunts- wapening	Dwars- krachtwape- ning
Uiterste grenstoestand balk 1	3 ϕ 16 2 ϕ 12	3 ϕ 16 2 ϕ 12	ϕ 8-150
Uiterste grenstoestand balk 2	3 ϕ 16 4 ϕ 12	2 ϕ 16	ϕ 8-300
Dimensioneren op brand	3 ϕ 20 2 ϕ 12	3 ϕ 16 2 ϕ 12	ϕ 8-150
Calamiteitsituatie 1	NA	5 ϕ 25 2 ϕ 16	ϕ 10-150
Calamiteitsituatie 2	NA	3 ϕ 25 2 ϕ 20	ϕ 8-150
Schoren in calamiteitsituatie 1 variant 1	5 ϕ 20	5 ϕ 20 2 ϕ 12	ϕ 8-150
Schoren in calamiteitsituatie 1 variant 2	6 ϕ 16 1 ϕ 12	8 ϕ 16	ϕ 8-150
Schoren in calamiteitsituatie 1 variant 3	4 ϕ 16 1 ϕ 12	5 ϕ 16 1 ϕ 12	ϕ 8-150
Schoren in calamiteitsituatie 2 variant 1	4 ϕ 12	2 ϕ 16 1 ϕ 12	ϕ 8-300
Schoren in calamiteitsituatie 2 variant 2	2 ϕ 16	2 ϕ 16 2 ϕ 12	ϕ 8-300
Schoren in calamiteitsituatie 2 variant 3	3 ϕ 16	2 ϕ 16	ϕ 8-300

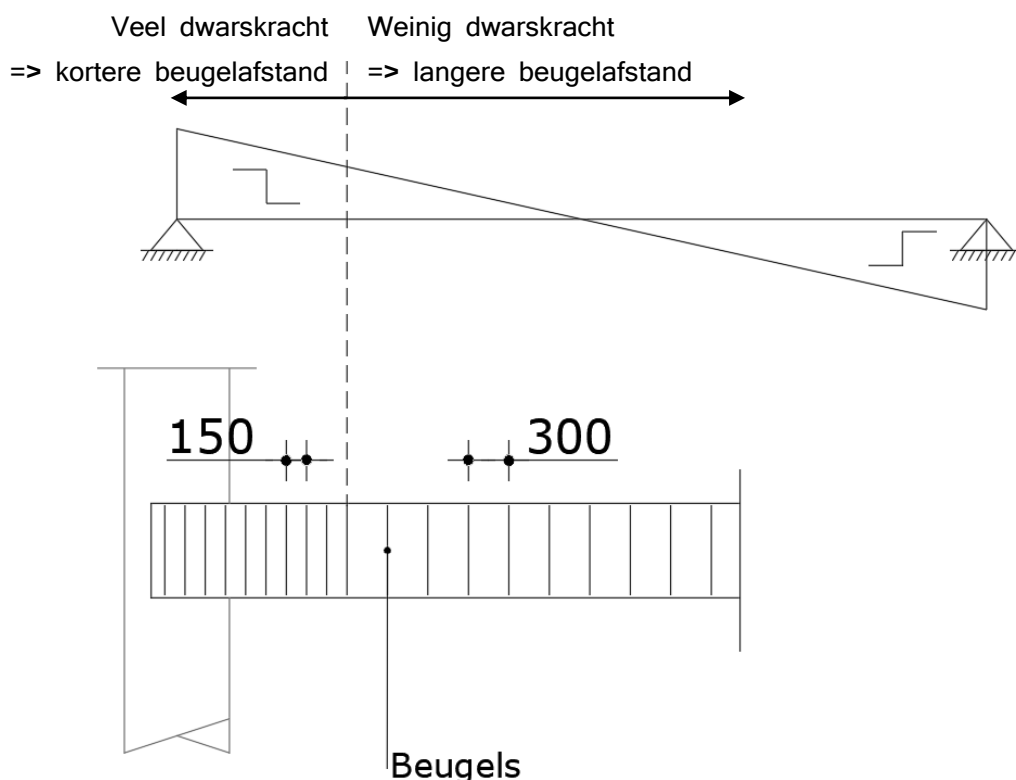
Tabel 5.4, vergelijking van de wapening in de balken

In tabel 5.4 is een overzicht te zien waarbij voor elke situatie de veld-, steunpunts- en dwarskrachtwapening bepaald is. Alle wapeningsberekeningen zijn te vinden in bijlage D hoofdstuk 6. Voor de uitvoering zal altijd de uiterste grenstoestand aangehouden worden. Indien er tijdens een calamiteit minder wapening nodig zou zijn dan in de uiterste grenstoestand, valt dit onder redundantie. Dat betekent dat de balk met de wapening uit de uiterste grenstoestand al voldoende capaciteit heeft om de krachten over te kunnen brengen. Wanneer er meer wapening benodigd is dan in de uiterste grenstoestand, zal op deze situatie gewapend worden. Daarnaast worden de

resultaten uit calamiteitsituatie 1 met de uiterste grenstoestand van balk 1 vergeleken en de wapening uit calamiteitsituatie 2 met de uiterste grenstoestand van balk 2.

Wat opvalt in tabel 5.4 is dat de uiterste grenstoestand al over weinig wapening beschikt. De verwachting was dat dit een stuk meer zou zijn gezien de belastingen die op het raamwerk staan. Verder vertoont tabel 5.4 veel overeenkomsten met tabel 5.1. Dat is niet meer dan logisch vanwege het feit dat de wapening bepaald wordt aan de hand van de krachtswerking uit tabel 5.1.

Om te beginnen zijn de verschillen in de dwarskrachtwapening niet heel erg groot. In de meeste situaties zijn er beugels van $\phi 8$ -150 nodig ter plaatse van het steunpunt. In een enkel geval kan voldaan worden met beugels van $\phi 8$ -300, maar daar wordt geen enorme winst gehaald. Dit komt mede doordat de dwarskrachtwapening bepaald is aan de hand van de maximale dwarskracht in het steunpunt. Aangezien de dwarskracht in het veld lager ligt, kan er in het veld ook voldaan worden met beugels van $\phi 8$ -300. Dat is te zien in figuur 5.13. Daarnaast zijn beugels van $\phi 8$ de standaard beugels. Hierdoor valt er weinig winst te halen in de dwarskrachtwapening. Alleen in calamiteitsituatie 1 zijn er grotere beugels nodig. Echter is dit geen groot verschil.



Figuur 5.13, bovenin is een voorbeeld van een dwarskrachtenlijn te zien, ter plaatse van de stippellijn splitst de dwarskrachtwapening zich op.

Wanneer er naar de veldwapening gekeken wordt valt er wat meer te analyseren. Zo zijn beide calamiteitsituaties niet te wapenen. Bij calamiteitsituatie 1 overschrijdt de wapening de maximale wapening, en in calamiteitsituatie 2 valt deze daar net onder. Echter is het niet mogelijk om binnen die marge te wapenen. Dit is reeds behandeld in hoofdstuk 5.5.1.

Bij het dimensioneren op brand is meer wapening benodigd dan in de uiterste grenstoestand. De drie staven van $\phi 16$ zullen verzwakt moeten worden naar $\phi 20$, willen deze de krachten op kunnen nemen. Dat heeft ermee te maken dat de sterkte van het wapeningsstaal door temperatuur gereduceerd wordt. Daardoor kunnen de hoekstaven in de balk maar 67% van de sterkte behouden. Dat is bepaald aan de hand van de 500°C -isothermmethode en heeft een negatief effect op de hoeveelheid wapening. In principe is dit hetzelfde als stalen constructies overdimensioneren op brand, zoals besproken is in de literatuurstudie over brand.

Voor het dimensioneren op brand is niet gekeken naar de steunpuntwapening. Dat heeft te maken met het gegeven dat de steunpuntwapening bovenin een balk wordt aangebracht. De balk wordt vanaf de onderkant en vanaf de zijkanten blootgesteld aan de brand en temperatuurverhoging. Daardoor zal de temperatuur bovenin de balk niet heel erg oplopen. Vanwege dit geringe verschil is het niet nodig om de steunpuntwapening ook nog via de 500°C -isothermmethode te bepalen.

Bij alle varianten met schoren is in calamiteitsituatie 2 voldoende veldwapening aanwezig in de uiterste grenstoestand. Dat betekent dat balk 2 voldoende redundantie heeft wanneer er schoren worden toegepast. Bij deze calamiteitsituatie is echter niet voldoende steunpuntwapening aanwezig. Dat heeft ermee te maken dat er in de uiterste grenstoestand in balk 2 en 3 weinig steunpuntsmoment aanwezig is. In alle varianten met schoren ontstaan er grotere steunpuntsmomenten. Dat is uitgelegd in hoofdstuk 5.5.3. De hoeveelheid 'bijleg' wapening is echter niet heel erg veel. In het ongunstigste geval zouden er twee staven van $\phi 12$ bijgelegd moeten worden in het steunpunt om de situatie op te vangen.

In calamiteitsituatie 1 is in zowel het veld als in het steunpunt meer wapening benodigd. In het veld is er in de ongunstigste situatie voornamelijk meer staaloppervlak nodig. In variant 1 zouden de vijf staven in de uiterste grenstoestand vergroot moeten worden van zowel $\phi 12$ als $\phi 16$ naar $\phi 20$. Uit tabel 5.1 kwam naar voren dat qua krachtswerking variant 3 het beste was. Dat geldt ook voor de veldwapening. Zo zou een staaf van $\phi 12$ vervangen kunnen worden naar $\phi 16$ om zo de krachten uit calamiteitsituatie 1 op te vangen. In het steunpunt zal er wel meer wapening nodig zijn. Zo zou de steunpuntwapening uit variant 3 vergroot kunnen worden door hier ook 1 staaf van $\phi 12$ te vergroten voor $\phi 16$ en daar nog een staaf van $\phi 16$ bij te leggen. Dat betekent dat er niet veel extra wapening nodig is. Daarnaast is calamiteitsituatie 1 de ongunstigste situatie waardoor deze wapeningshoeveelheid benodigd is. Wanneer een balk en kolom dichtbij de schoorconstructie zitten zou er wellicht minder wapening nodig zijn. Dit is ook te verklaren aan de

hand van calamiteitsituatie 2. In deze situatie zit de bezwijken kolom recht onder de schoorconstructie. Wanneer er gekeken wordt naar de wapening tijdens calamiteitsituatie 2 is er in alle drie de varianten minder nodig dan wat er in de uiterste grenstoestand vereist is. Hierdoor hoeft er niet in de hele constructie extra gewapend te worden op calamiteitsituatie 1.

	Kolomwa- pening
Uiterste grenstoestand kolom 1	12 ϕ 25
Uiterste grenstoestand kolom 2	4 ϕ 16
Dimensioneren op brand	12 ϕ 25
Calamiteitsituatie 1	12 ϕ 25
Calamiteitsituatie 2	4 ϕ 12
Schoren in calamiteitsituatie 1 variant 1	4 ϕ 20 4 ϕ 16
Schoren in calamiteitsituatie 1 variant 2	4 ϕ 12 4 ϕ 16
Schoren in calamiteitsituatie 1 variant 3	4 ϕ 16
Schoren in calamiteitsituatie 2 variant 1	4 ϕ 12

Tabel 5.5, vergelijking van de wapening in de kolommen

In tabel 5.5 is een overzicht te vinden met daarin de kolomwapening per situatie. Voor calamiteitsituatie 2 met schoren is zoals te zien in de tabel maar voor één variant de kolomwapening uitgerekend. Uit tabel 5.2 kwam namelijk een minimaal verschil uit in de krachtswerking tussen de verschillende schoren varianten. Om tijd te besparen is er daarom voor gekozen om maar 1 kolom uit te rekenen.

Wat opvalt in tabel 5.5 is dat kolom 1 al in de uiterste grenstoestand redelijk veel wapening bevat. Dat heeft ermee te maken dat de kolom zelf een slanke afmeting heeft. Dat zorgt ervoor dat de tweede-orde momenten oplopen. Het tweede-orde moment om de zwakke as is opgelopen met een factor drie. Dat zorgt ervoor dat er meer wapening in de doorsnede nodig is. Vanwege het feit dat in de uiterste grenstoestand al een behoorlijke hoeveelheid wapening aanwezig is, voldoen nagenoeg alle kolommen met de wapening uit de uiterste grenstoestand.

De dimensionering op brand is er niet de hoeveelheid wapening bepaald maar getoetst. Deze wordt getoetst aan de hand van de 500°C-isothermmethode. Dat komt omdat de kolomtabellen uit de GTB niet gebruikt mogen worden voor deze methode (Lagendijk & Van der Veen & Braam, 2007). Een doorsnede-berekening is dan nog de enige overige optie. Eerst zijn er handberekeningen gemaakt voor deze doorsnede-controle. Uit deze berekeningen kwam naar voren dat er drukwapening benodigd was. De complexiteit van een doorsnede-berekening met drukwapening heeft ervoor gezorgd dat deze controle via Scia Engineer wordt uitgevoerd. De uitvoer hiervan is te vinden in bijlage D hoofdstuk 6.15.1.

Er zijn een aantal zaken die nog nadere uitleg behoeven ten aanzien van de ingevoerde kolom in Scia Engineer.

- Als eerste is de kolom voor één meter lengte ingevoerd. Het betreft hier een doorsnede controle. Daardoor is het niet van belang om de hele kolom in te voeren.
- Ten tweede is er in het gebruikte pakket van Scia geen mogelijkheid om de veiligheidsfactoren op 1,0 te zetten. Daarom is in Scia de betonsterktekwaliteit C30/37 ingevoerd. De f_{cd} wordt dan 20N/mm². Dat is gelijk aan de sterkte van C20/25 in een brandsituatie.
- De sterkte van de wapening wordt vooraf gereduceerd door middel van K_s . Dit zorgt voor een zwakkere sterkte vanwege de hogere temperaturen. Er is gekozen voor de ongunstigste reductiefactor tussen de hoekstaven en de overige staven.
- Als laatste is de wapening zonder dekking aangebracht in Scia. De doorsnede is vanwege de 500°C-regel gereduceerd. Daardoor komt de wapening in de 'nieuwe' situatie tegen de buitenkant van de netto doorsnede aan te liggen. Alleen de beugels vallen net buiten de gereduceerde doorsnede. Deze vallen in Scia nog net binnen de doorsnede. Het is daarmee niet compleet nauwkeurig.

Uiteindelijk is te zien dat de drukwapening uit de uiterste grenstoestand ook tijdens brand voldoet. De unity-checks laten zien dat het wel tegen de limiet aan zit (hoogste unity-check is 0,93). Daardoor is het mogelijk om de kolom bloot te stellen aan brand bij een brandwerendheid van 120 minuten.

Alle andere varianten binnen de uiterste grenstoestand is het niet nodig om de kolommen te versterken met wapening. Een verklaring hiervoor is dat op het moment dat er een kolom bezwijkt in het raamwerk tussen de liftschacht en de galerijwand, deze twee elementen stijver zijn dan de kolommen die daartussen zitten. Vanwege die stijfheidsverhouding en de schoren die de trekkrachten overbrengen naar deze twee elementen, worden de overige kolommen minder zwaarbelast ten opzichte van de uiterste grenstoestand.

Die schoren hebben hier ook een aandeel in, gezien het feit dat in de calamiteitsituaties zonder maatregelen de kolomrij aan de binnenkant naast de bezweken kolom een flinke belasting naar

zich toe trekt. Bij de schoren wordt deze belasting meer naar de overige kolommen bij de liftschacht en de galerijwand toegebracht. De kolom bij de liftschacht wordt niet zwaarder belast dan in de uiterste grenstoestand (2540kN - 2976kN), de galerijwand wordt wel zwaarder belast ten opzichte van de uiterste grenstoestand (1801kN - 3140kN). Hier dient rekening mee gehouden te worden bij het ontwerpen van een tweede draagweg via schoren. Er zal daarmee meer wapening nodig zijn in de wand om de krachten op te kunnen nemen.

6. Conclusies en aanbevelingen

6.1. Hoofdvraag

Voor de eindconclusie wordt antwoord gegeven op de hoofdvraag.

In hoeverre is de constructie van gebouw B van het Maankwartier te Heerlen via een tweede draagweg draagkrachtig te houden in een buitengewone situatie zoals brand?

De constructie van gebouw B van het Maankwartier te Heerlen is binnen het onderzochte raamwerk volledig draagkrachtig te houden tijdens een calamiteit zoals brand. Hiervoor zijn verschillende mogelijkheden.

Het is mogelijk om de constructie te dimensioneren op brand. Hierbij wordt er uitgegaan van het feit dat de gehele constructie blijft staan. De constructie kan dan met vereenvoudigde berekeningsmethoden (500°C-isothermmethode) gedimensioneerd/getoetst worden op brand. De dimensionering geldt dan alleen voor de balk. De kolom zal een toetsing nodig hebben van de wapening uit de uiterste grenstoestand tijdens brand. Uit de resultaten blijkt dat de balk iets meer veldwapening nodig heeft vanwege de afnemende sterkte tijdens brand. De kolom heeft in de casus van het Maankwartier genoeg wapening om het effect van brand op te vangen.

Ook is het mogelijk om een tweede draagweg te realiseren via schoren. De schoren werken pas op het moment dat er een kolom in de constructie bezwijkt. De schoren zullen dan werken als een hangconstructie die de krachten omleiden. Er zijn meerdere mogelijkheden om dit uit te voeren. Binnen de onderzochte varianten is variant 3 de beste oplossing wanneer er geen rekening gehouden hoeft te worden met randzaken zoals de indeling van de architect. Door het aanbrengen van schoren om een x aantal verdiepingen kan er op een willekeurige plek een kolom bezwijken zonder dat de krachtswerking in de constructieve elementen te hoog oploopt. Ook als er een vergelijking wordt gemaakt in de wapening is te zien dat er voor variant 3 de minste wapening bijgelegd moet worden. Dit geldt voor zowel de veldwapening als de steunpuntwapening. Alleen de maximale trekkracht in de schoren is variant 3 niet het gunstigst. De normaaltrekkracht is in variant 2 het laagst. Dat verschil kan er echter niet voor zorgen dat de strip een kleinere dimensie krijgt of dat de verbinding minder stevig uitgevoerd kan worden. Wat wel de aandacht verdient binnen een tweede draagweg via schoren is dat de omliggende elementen zwaarder belast kunnen worden dan voorheen.

6.2. Deelvragen

Om tot een antwoord te komen voor de hoofdvraag zijn er ook deelvragen gesteld. De antwoorden van deze vragen zijn hieronder te vinden.

1. *Welke eerdere gevallen van ingestorte gebouwen zijn bekend en welke type instortingen zijn er?*

In de geschiedenis zijn er meerdere gebouwen ingestort. Er is voor dit onderzoek een selectie gemaakt van bekende en interessante instortingen. Dat betekent niet alle instortingen die er ooit hebben plaatsgevonden behandeld zijn. Dat is ook niet mogelijk. Niet alle instortingen in de geschiedenis zijn bekend. In bijlage B01 zijn een aantal bekende instortingen behandeld.

De manier waarop gebouwen kunnen instorten zijn in de literatuur ingedeeld in 4 categorieën. De eerste categorie is de stoot-instorting. Hierbij is er sprake van extra belasting op een constructieonderdeel in een korte tijd. Dit komt vaak door vallende of het kantelen van elementen tegen andere constructie elementen aan. Dat kan verticaal (pannenkoek-instorting) of horizontaal (domino-instorting) instorten. De tweede categorie is de herverdelingsinstorting. Dit houdt in dat, zodra er een constructief element wegvalt, er belasting moet worden herverdeeld. Dat kan op gebouwniveau (rits-instorting) of op elementniveau (doorsnede-instorting) gebeuren. De derde categorie is de instabiliteits-instorting. Constructieve elementen kunnen bezwijken ten gevolge van bezwijken stabiliteitsvoorzieningen. De laatste categorie is een instorting die de vorige instortingsvormen combineert. Dit heet de combinatie-instorting.

3. *Wat is de huidige wetgeving op het gebied van constructies bij brand?*

Een constructie moet voldoen aan de eisen van de Eurocode. Een calamiteits situatie zoals brand valt volgens de Eurocode onder de categorie buitengewone situaties. De maatregelen die genomen moeten worden hangen af van de gevolgklasse.

Voor gevolgklasse CC1 zijn geen extra maatregelen vereist ten aanzien van de robuustheid. Gevolgklasse CC2 kent voor buitengewone situaties twee sub-gevolgklassen. Bij gevolgklasse CC2a zijn trekbanden in horizontale en verticale richting in alle vloeren en kolommen vereist. Deze trekbanden kunnen in gevolgklasse CC2b ook toegepast worden. Echter mag ook aangetoond worden dat er op elke (denkbeeldige) plek een kolom mag bezwijken. De functie van trekbanden wordt echter betwijfeld (De Boer, 2012). Volgens de heer Rick Dielissen en mevrouw Suzan van den Winkel (persoonlijke communicatie, 8 juni 2018) zeggen experts dat de trekbandenfunctie alleen werkt wanneer de trekbandwapening de krachten horizontaal in één richting kan afdragen. In een hoekveld is dit bijvoorbeeld niet mogelijk waardoor trekbanden niet veilig zijn.

Voor gevolgklasse CC3 dient er een risicoanalyse uitgevoerd te worden. In de NEN-EN 1991-1-7 zijn richtlijnen opgesteld voor het uitvoeren van een risicoanalyse.

Volgens de heer Rick Dielissen en mevrouw Suzan van den Winkel (persoonlijke communicatie, 8 juni 2018) kunnen de eisen ten aanzien van robuustheid per gemeente verschillen. Dit hangt af van de beschikbare kennis bij de gemeente. Het is daarmee mogelijk dat er in de ene gemeente strengere eisen worden gesteld aan constructie.

4. Welke opties zijn er ten aanzien van een tweede draagweg in een gebouw en wat zijn de alternatieven?

In het gebouw is er een optie voor het aanbrengen van schoren. Deze schoren zorgen ervoor dat op het moment dat een kolom bezwijkt de krachten via de schoren worden opgevangen. Deze schoren houden daarmee de constructie overeind. Er zijn meerdere varianten voor het plaatsen schoren mogelijk. Zo is het mogelijk om deze bovenin het gebouw te plaatsen. Hierbij dienen deze schoren als hangconstructie voor de rest van de draagstructuur. Uit de literatuur blijkt dat dit een variant is die al vaker is toegepast. Een andere bekeken optie is een variant waarbij om een x aantal verdiepingen schoren worden geplaatst. De schoren liggen dan in het ongunstigste geval toch dichtbij de calamiteitsituatie.

Een alternatief voor een tweede draagweg is het dimensioneren van de constructie op brand. Hierbij wordt er gekeken naar de warmteontwikkeling en de vuurlast op de constructie. Wanneer er dan getoetst wordt op een brand, kan bepaald worden of de constructie kan blijven staan. Deze methode gaat ervan uit dat er geen constructieve elementen mogen bezwijken. Wanneer er voor deze oplossing gekozen wordt kan er gekozen worden voor eenvoudige of geavanceerde berekeningsmethoden. De eenvoudige methode is minder accuraat dan de geavanceerde methode, maar het is de vraag of het de moeite waard is om een geavanceerd model te laten maken. Voor een geavanceerd model zou een externe gespecialiseerde partij betrokken moeten zijn. Tijdens dit onderzoek is er ook contact geweest met een specialistisch bedrijf. Echter dit bedrijf gaf aan dat de thermische waarde van de constructie verwaarloosd wordt en brand vaak gemodelleerd wordt voor brandveiligheidseisen in plaats van constructieve doeleinden. In de literatuur wordt er over de mogelijkheden gesproken, maar er wordt ook gesteld dat er nog veel stappen te zetten zijn voor dit volledig representatief is.

Het is ook mogelijk om de constructie te bekleden met brandvertragende materialen. Dit is in de literatuurstudie over brand aan bod gekomen. Hierbij wordt de constructie ingepakt met bijvoorbeeld isolatiemateriaal. Het is ook mogelijk om de constructie te behandelen met een brandwerende spuitmortel of een brandwerende coating. Belangrijk is dat de brandwerende coating voor beton een ander soort coating is dan voor staal. Vaak heeft het bekleden van de constructie

impact op het zicht. Wanneer een architect vanuit esthetisch oogpunt bijvoorbeeld een slanke constructie wil, zal er met bekleding vaak niet voldaan worden aan dat beeld.

5. Wat is de impact van het wegvallen van een constructief element zoals een kolom?

Wanneer er in een 2d-raamwerk een kolom wegvalt, is er een duidelijke impact te zien. De belasting wordt nu over het resterende deel van de constructie herverdeeld. Wat te zien is in de constructie is dat er een verschil in stijfheden ontstaat. Dit maakt niet uit voor de plek waar een kolom bezwijkt. De kolomrij waar een kolom in is bezweken zal, in vergelijking met de rest, slap worden. Hierdoor is er een andere stijfheidsverhouding dan in de uiterste grenstoestand. Hoe stijver een constructie onderdeel is, hoe meer belasting deze tot zich neemt. Dat is goed te zien in de uitvoer van beide calamiteitsituaties. De kolomrijen naast de bezweken kolom vangen meer belasting op. Hierdoor worden de steunpuntsmomenten in die kolommen erg groot. Dit heeft allemaal te maken met die stijfheidsverhouding. Het zorgt ervoor dat alle kolommen boven de bezweken kolom weinig constructieve waarde hebben in een calamiteitsituatie. Ook zal er meer normaalkracht worden verspreid over de aanliggende kolommen.

Een ander punt van aandacht is dat er ter plaatse van het steunpunt van de bezweken kolom, een groter positief moment ontstaat. Dit heeft ook met stijfheidsverhoudingen te maken. De kolom naast de bezweken kolom wordt door de extra normaalkracht dusdanig ingedrukt, dat de kolom onder de bezweken kolom stijver is dan de kolom die extra belast wordt. Hierdoor trekt deze meer belasting naar zich toe, wat resulteert in een groot positief moment.

6. Wat is de reststerkte van een constructie na een incident zoals brand?

Het bepalen van de reststerkte van de constructie hangt af van het toegepaste materiaal. In de literatuurstudie is beschreven dat staal ander gedrag vertoont tijdens afkoeling dan beton. Zo zal staal na afkoeling ongeveer 95-100% van zijn sterkte terugkrijgen. Dat betekent dat het staal voor de sterkte geen verdere behandeling nodig heeft. Wel kan staal plastisch vervormen onder invloed van een brand. Om na een brand de plastische vervorming te herstellen, zullen er reparaties nodig zijn.

Voor beton is het een stuk lastiger om te bepalen wat de reststerkte is. Chemische processen kunnen door de brand aangetast worden. De kans bestaat dat er intern scheurvorming is ontstaan of dat het beton gevoelig is geworden voor brosse breuken. Dit is niet te zien vanuit het menselijk perspectief. Dat kan gevaarlijke situaties opleveren als die scheurvorming of brosse breuk is ontstaan door chemische aantasting. Dit leidt dan tot een instorting. Vanwege dit gevaar moet beton dat warmer is geworden dan 300-400°C gerepareerd of verwijderd worden. Een reststerkte valt voor dus bij beton nagenoeg niet te geven.

6.3. Aanbevelingen

Ten eerste is het realiseren van robuustheid van constructies geen standaardprocedure. De gebouwen waarvoor robuustheid geldt, zijn over het algemeen geen standaard gebouwen. Er zijn allerlei factoren die invloed hebben op de keuze over hoe de robuustheid in de constructie wordt ingebouwd. Belangrijk is dat er al in een vroeg stadium met de architect, aannemer en opdrachtgever bekeken wordt wat de mogelijkheden zijn. Wanneer de architect de constructie bijvoorbeeld graag zichtbaar wil hebben, zal er geen bekleding mogelijk zijn en is een keuze voor een tweede draagweg met schoren of dimensioneren op brand logisch. Er zijn ook situaties denkbaar waarbij de constructie slank moet zijn. Ook dan is een tweede draagweg een goede keuze.

Wanneer er wordt gekozen voor een tweede draagweg met schoren, is het aan te raden om schoren aan te brengen om een x aantal verdiepingen. Uit de resultaatanalyse is naar voren gekomen dat bij deze optie de krachtswerking het meest overeenkomt met die van de uiterste grenstoestand. Hierdoor levert deze variant de minste kilo's extra staal op ten opzichte van de andere opties. Dat is gunstig voor de prijs. Een aandachtspunt voor de schoren om een x aantal verdiepingen is dat er een aantal kolommen wel degelijk zwaarder belast worden dan in de uiterste grenstoestand. Dit hoeft geen probleem te zijn. Voor de vergunning is een berekening vereist, waardoor dit probleem voor de constructeur toch in kaart komt. Daarnaast moet er al van tevoren met de architect afgestemd zijn dat op de afgesproken verdiepingen, waar de schoren geplaatst worden, er geen verkeersruimte is ter plaatse van de schoren. Het is namelijk onpraktisch als er midden in het gangpad een schoor staat. Afstemming met de architect is hiervoor noodzakelijk. Wanneer er geen ruimte is voor schoren om een x aantal verdiepingen, maar wel bovenin de constructie, is het mogelijk deze hier te plaatsen. Dit biedt ook bescherming tegen een op een willekeurige plek bezwijken kolom. Er zal wel meer wapening nodig zijn om dit op te vangen ten opzichte van de schoren om een x aantal verdiepingen.

6.3.1. Vervolgonderzoeken

In het huidige onderzoek is er gefocust op specifiek deze onderwerp. Echter zijn er nog interessante vervolgonderzoeken mogelijk. Een belangrijk aspect dat nog nader onderzocht zou kunnen worden is de tweede draagweg van de constructie in een 3d-situatie. In dit onderzoek is er gekeken naar een 2d-raamwerk. Dat betekent dat er alleen op dit stramien in het raamwerk een tweede draagweg aanwezig is. Daarnaast kan de tweede draagweg met een 2d-raamwerk alleen verkregen worden door middel van de constructie uit dat specifieke raamwerk. Hierin is de invloed van de vloeren die aan de balk zitten niet meegenomen. Dat is een aspect waar zeker nog aandacht aan besteed kan worden. In de huidige situatie zal de kanaalplaatvloer die aan de balk vast zit nauwelijks meewerken. De breedplaatvloer aan de andere kant daarentegen, zou wellicht als een membraan kunnen werken wanneer er een kolom bezwijkt. De invloed hiervan zou alleen in een 3d-studie te achterhalen zijn.

Een ander aspect waar verder onderzoek naar gedaan kan worden, is de warmte-invloed in de betondoorsnede. Deze is in dit onderzoek buiten beschouwing gelaten, terwijl er wel contact is geweest met een gespecialiseerd bedrijf voor het maken van CFD-modellen. Dit bedrijf vertelde dat ze de thermische waarde van de constructie niet meenemen. De bepaling van een nauwkeurige temperatuurontwikkeling in een betondoorsnede zou kunnen leiden tot winst. Een resultaat zou kunnen zijn dat er meer aan betonoppervlak in de betondoorsnede meegerekend mag worden dan via de methode met grafieken. Hierdoor is er winst te halen binnen de afmetingen van het project.

Nawoord

Van tevoren was het plan om voor het Maankwartier een tweede draagweg te maken. Het doel van deze studie was het creëren van een tool die gebruikt kan worden voor het ontwerpen van een tweede draagweg. Gaandeweg ben ik erachter gekomen dat een tweede draagweg niet standaard ingebouwd kan worden.

Tijdens het verrichten van de literatuurstudies lag de focus nog niet op het constructieve aspect. De literatuurstudies naar instortingen waren zeer waardevol voor het begrijpen van robuustheid. Het literatuurstuk naar de fysische aspecten van brand was minder van belang in het hoofdonderzoek. Voor mijn persoonlijk algeheel begrip rondom brand vond ik het waardevol. Voor het eindresultaat van mijn onderzoek was het van minder groot belang.

Toen duidelijk werd dat de oorspronkelijke constructie van het Maanhotel te ingewikkeld was voor het onderzoek, heb ik in overleg met Volantis vrij snel besloten om dit ontwerp te vereenvoudigen. Het vereenvoudigen van de constructie duurde helaas langer dan de bedoeling was. Vaak kwamen er zaken tussen die sommige berekeningen lieten vervallen. Dat was jammer aangezien dit kostbare tijd verspilde en de efficiëntie van het onderzoek niet ten goede kwam. Get heeft dan ook voor de nodige vertraging gezorgd. Toen ik eenmaal een raamwerk gemaakt had, kon het onderzoek verder.

Vanaf dat moment ging het vrij snel. Tijdens het hoofdonderzoek is naar voren gekomen dat het de moeite waard is om verschillende oplossingen te bekijken, waaronder het bijleggen van wapening, dimensioneren op brand en het aanbrengen van schoren. Dat idee is pas tijdens het hoofdonderzoek tot stand gekomen. Daarnaast was van tevoren het idee om het Maankwartier te voorzien van een tweede draagweg. Tijdens het hoofdonderzoek hebben we besloten om het toch met een algemenere blik te bekijken. Zo hadden we een tweede draagweg kunnen realiseren met de calamiteitsituaties als uitgangspunt, maar we hebben ervoor gekozen om naar een algemenere oplossing te zoeken. Zo zijn we op het idee gekomen om schoren aan te brengen om een x aantal verdiepingen.

Door alle berekende waardes naast elkaar te zetten ontstond er een mooie vergelijking waar ook echt iets uit geconcludeerd kon worden. Ik was zeer blij met de snelle verwerking van de data en de duidelijk van elkaar verschillende gegevens. Alleen de 500°C-isothermmethode kostte flink wat moeite. Ik heb samen met mijn begeleider veel tijd in die berekening gestopt. Dat heeft aan het einde ook voor tijdsdruk en stress gezorgd.

De laatste weken die gebruikt zijn voor het documenteren verliepen voorspoedig en daar hebben geen bijzonderheden plaatsgevonden.

Literatuur en informatiebronnen

Bibliografie

Anzion, Danny & Den Ouden, Mark & Winnen, Leonique (2012). *Betonconstructies bij brand* (Bachelorscriptie). Bouwkunde, Hogeschool van Arnhem en Nijmegen, Arnhem.

Auteur onbekend (2007). *Kasteel of kaartenhuis*. Den Haag: VROM.

Auteur onbekend (2013). *Werken met Fire Safety Engineering*. Geraadpleegd op 7 maart 2018, van <http://www.sbrcurnet.nl/producten/publicaties/werken-met-fire-safety-engineering>

Auteur onbekend (2014). *Brandweerstatistiek 2013*. Geraadpleegd op 15 februari 2018, van <https://www.cbs.nl/NR/rdonlyres/A42E330D-EEA7-469B-A1DC-F3721CCAB2AF/0/brandweerstatistiek2013.pdf>

Bolle, Simon (2009). *Progressive collapse indicator* (Master's Thesis). Department of Structural and Building Engineering, TU/Delft, Delft.

Borsje, H. & Dieteren, G.G.A. (2017). *Onderzoek naar de technische oorzaak van de gedeeltelijke instorting van de in aanbouw zijnde parkeergarage P1 Eindhoven Airport*. Geraadpleegd op 8 februari 2018, van https://www.bam.com/sites/default/files/domain-606/documents/ea_tno_rapport_2017_r11127_mpb_eindhoven_airport_def-606-15063313471940694214.pdf

Bos, F.P. (2008). Veilig construeren met glas. *Cement*, 2, 9-13.

Bouquet, G. Chr. (2006). Brandveilig ontwerpen in beton. *Cement*, 7, 22-24.

Bouts, Ruud (2016). *Hoofdberekening bouwdeel B*. Venlo: Volantis BV.

Braam, C.R. (2010). *Ontwerpen in gewapend beton, deel 4*. 's-Hertogenbosch: Aeneas.

Building Performance Assessment Team, (1996). *The Oklahoma City Bombing: Improving Building Performance Through Multi-Hazard Mitigation*. Geraadpleegd op 6 februari 2018, van https://www.fema.gov/media-library-data/20130726-1453-20490-7474/fema_277_ok_city.pdf

Campbell, Peter (2001). *Learning from Construction Failures: Applied Forensic Engineering*. z.p.: Wiley.

Capote, Jorge A. & Lázaro, Mariano & Alvear, Daniel & Espina, Pablo (2006). *Analysis of thermal fields generated by natural fires on the structural elements of Tall Buildings*. Geraadpleegd op 12 februari 2018, van https://www.era.lib.ed.ac.uk/bitstream/handle/1842/1989/Capote_et_al_winsdortower_santander_06.pdf?sequence=1&isAllowed=y

De Boer, J.N. (2012). *Tweede draagweg van een hoekveld in prefab beton* (Masterscriptie). Architecture, Building and Planning, TU/Eindhoven, Eindhoven.

De Jong, Aldo & Hasselaar, Bas (2012). *Brandveiligheid: Ontwerpen en toetsen - deel C*. Rotterdam: Deckerssnoeck.

De Leeuw, Kees & Brouwers, Roel (2013). Zwaar en licht gecombineerd. *Cement*, 2, 58-64.

Denoël, J.F. (2006a). Beton en brand. *Cement*, 7, 31-35.

Denoël, J.F. (2006b). *Brandbescherming door betonconstructies*. Geraadpleegd op 22 maart 2018, van http://www.febelcem.be/fileadmin/user_upload/dossiers-ciment-94-08/nl/37_nl.pdf

Denoël, J.F. (2007). *Brandveiligheid en betonconstructies*. Geraadpleegd op 22 maart 2018, van http://www.febelcem.be/fileadmin/user_upload/autres-publications/nl/docref_feu_nl.pdf

Eggink - Eilander, S. (2013). *Brandveiligheidsinstallaties in gebouwen*. Den Haag: Sdu uitgevers.

El Kamari, Y. & Raphael, W. & Chateauneuf, A. (2015). Reliability study and simulation of the progressive collapse of Roissy Charles de Gaulle Airport. *Case Studies in Engineering Failure Analysis*, 3, 88-95.

Engels, A. (2005). Risicobeheersing bij ontwerpen van gebouwen. *Cement*, 3, 24-27.

Evers, H.B. (1970). Gebouwen voorzien van met water gevulde stalen kolommen. *Bouwen met staal*, 14, 12-13.

Fact finding Officers, (2013). *Broken Dreams: A Report on the Rana Plaza Collapse*. Geraadpleegd op 9 februari 2018, van http://odhikar.org/wp-content/uploads/2013/06/Fact-finding_RMG_Rana-Plaza_Eng.pdf

Franken, Linda (2017). *Hoge Veer Bastion*. Venlo: Volantis BV.

Gardner, N.J. & Huh, Jungsuck & Chung, Lan (2001). *Lessons from the Sampoong department store collapse*. Geraadpleegd op 8 februari 2018, van <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946501000683>

Hamerlinck, A.F. (2009). *FSE van constructies in praktisch perspectief*. Geraadpleegd op 11 mei 2018, van <http://www.brandveiligmetstaal.nl/upload/file/r%20hamerlinck%20fse%20perspectief%20en%20praktijk.pdf>

Hamerlinck, A.F. (2010). *Brand*. Zoetermeer: Bouwen met staal.

Haven, Jolanda (2008). Onderzoek vluchtgedrag. *GRIP*, 11, 269-299.

Heezemans, J.J. (2012). *Het Voorkomen van Voortschrijdende Instorting bij Prefab Betonconstructies* (Masterscriptie). Faculteit Bouwkunde, TU/Eindhoven, Eindhoven.

Hordijk, Dick & Gijsbers, Jan & Both, Kees & Klein-Holte, Ronald (2011). Nieuwe maatregelen kanaalplaatvloeren (1). *Cement*, 5, 20-31.

Huijben, Rob (2014). Parkeergarage als visitekaartje. *Cement*, 8, 46-51.

Janssen, Bart & Janssen, Tjerk & Lamers, Martijn (2013). *Voorkomen is beter dan genezen*. Geraadpleegd op 8 februari 2018, van <https://www.cementonline.nl/artikel/voorkomen-is-beter-dan-genezen>

Jeffrey, W.A. & Duthinh, D. & Lew, H.S. (2007). *Best Practices for Reducing the Potential for Progressive Collapse in Buildings*. Geraadpleegd op 20 maart 2018, van <https://www.nist.gov/publications/best-practices-reducing-potential-progressive-collapse-buildings>

Keijzers, V.G. (2017). *Construeren Beton deel 7, Kolommen (en wanden) in geschoorde constructies*. 's-Hertogenbosch: Avans Hogeschool.

Ketel, J.A & Van Vliet, H.A. (1999). Waterkoeling maakt kantoorgebouw brandveilig. *Bouwen met staal*, 148, 30-35.

Kleinman, Cees & Linssen, Jacques (2011). Brand en kanaalplaatvloeren. *Cement*, 5, 4.

Klösters, Gerry & Klein-Holte, Ronald & Van Dongen, Ad (2011). Nieuwe maatregelen kanaalplaatvloeren (2). *Cement*, 5, 32-39.

Kobes, M. (2010). *Wayfinding bij brand*. Geraadpleegd op 30 april 2018, van https://www.ifv.nl/kennisplein/Documents/206890_668_1284987273469-wayfinding_bij_brand.pdf

Lagendijk, Paul & Van der Veen, Cor & Braam, René (2007). Brand en de Eurocode 2. *Cement*, 7, 54-60.

Lagendijk, Paul & Mulder, Sven (2011). Brandwerendheid kanaalplaatvloeren. *Cement*, 8, 71-81.

Levy, Matthys & Salvadori, Mario (2002). *Why buildings fall down*. New York: WW Norton & Company.

Lew, H.S. & Bukowski, Richard W. & Carino, Nicholas J. (2005). *Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster. Design, Construction, and Maintenance of Structural and Life Safety Systems*. Geraadpleegd op 7 februari 2018, van http://ws680.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=101332

Lottman, Bas & Snel, Aryen & Kaalberg, Frank (2017). Spatmechanisme bepalend voor brandveiligheid tunnels. *Cement*, 8, 26-35.

Mans, D.G. (2007). Leren van instortingen. *Cement*, 4, 24-27.

Marshall, R.D. & Pfrang, E.O. & Leyendecker, E.V. & Woodward, K.A. (1982). *Investigation of the Kansas City Hyatt Regency Walkways Collapse*. Geraadpleegd op 6 februari 2018, van http://ws680.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=908286

McAllister, Therese & Corley, Gene (2002). *World Trade Center Building Performance Study: Data Collection, Preliminary Observations, and recommendations*. Geraadpleegd op 7 februari 2018, van <https://www.fema.gov/media-library/assets/documents/3544>

Millar, Darin & Falger, Mischa (2017). Performance based fire engineering. *Cement*, 8, 36-40.

Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties. (2018, 1 januari). *Bouwbesluit 2012*. Geraadpleegd op 8 maart 2018, van <https://rijksoverheid.bouwbesluit.com/Inhoud/docs/wet/bb2012>

Mulder, Sven & Kraak, Jan (2014). Opgewarmd of uitgekookt? *Cement*, 8, 70-79.

Normcommissie 351 001 "Technische Grondslagen voor Bouwconstructies". (2011, 1 december). *NEN-EN 1990+A1+A1/C2: Eurocode: Grondslagen van het constructief ontwerp* [NEN Connect]. Geraadpleegd op 20 februari 2018, van <https://connect.nen.nl/Standard/Detail/162984?compld=11921&collectionId=0>

Normcommissie 351 001 "Technische Grondslagen voor Bouwconstructies". (2011, 1 december). *NEN-EN 1991-1-2+C1/NB: Nationale bijlage bij NEN-EN 1991-1-2+C1: Eurocode 1: Belastingen op constructies - Deel 1-2: Algemene belastingen - Belasting bij brand* [NEN Connect]. Geraadpleegd op 23 februari 2018, van <https://connect.nen.nl/Standard/Detail/161436?compld=11921&collectionId=0>

Normcommissie 351 001 "Technische Grondslagen voor Bouwconstructies". (2011, 1 december). *NEN-EN 1991-1-2+C1: Eurocode 1: Belastingen op constructies - Deel 1-2: Algemene belastingen - Belasting bij brand* [NEN Connect]. Geraadpleegd op 23 februari 2018, van <https://connect.nen.nl/Standard/Detail/160413?compld=11921&collectionId=0>

Normcommissie 351 001 "Technische Grondslagen voor Bouwconstructies". (2011, 1 december). *NEN-EN 1991-1-7+C1+A1: Eurocode 1: Belastingen op constructies - Deel 1-7: Algemene belastingen - Buitengewone belastingen: stootbelastingen en ontploffingen* [NEN Connect]. Geraadpleegd op 24 februari 2018, van <https://connect.nen.nl/Standard/Detail/207228?compld=11921&collectionId=0>

Normcommissie 351 001 "Technische Grondslagen voor Bouwconstructies". (2011, 1 december). *NEN-EN 1992-1-2+C1: Eurocode 2: Ontwerp en berekening van betonconstructies - Deel 1-2: Algemene regels - Ontwerp en berekening van constructies bij brand* [NEN Connect].

Geraadpleegd op 24 februari 2018, van

<https://connect.nen.nl/Standard/Detail/158489?compld=11921&collectionId=0>

Normcommissie 351 001 "Technische Grondslagen voor Bouwconstructies". (2011, 1 december). *NEN-EN 1993-1-2+C2: Eurocode 3: Ontwerp en berekening van staalconstructies - Deel 1-2: Algemene regels - Ontwerp en berekening van constructies bij brand* [NEN Connect].

Geraadpleegd op 23 februari 2018, van

<https://connect.nen.nl/Standard/Detail/164759?compld=11921&collectionId=0>

Normcommissie 351 001 "Technische Grondslagen voor Bouwconstructies". (2011, 1 december). *NEN-EN 1994-1-2+C1: Eurocode 4: Ontwerp en berekening van staalbetonconstructies - Deel 1-2: Algemene regels - Ontwerp en berekening van constructies bij brand* [NEN Connect].

Geraadpleegd op 26 februari 2018, van

<https://connect.nen.nl/Standard/Detail/167148?compld=11921&collectionId=0>

Notenboom, Ben (2016). *Onderzoek naar oorzaak instorting pand Markt 31 's-Hertogenbosch*.

Geraadpleegd op 12 februari 2018, van [https://www.s-](https://www.s-hertogenbosch.nl/uploads/media/Onderzoeksrapport_BouwQ.pdf)

[hertogenbosch.nl/uploads/media/Onderzoeksrapport_BouwQ.pdf](https://www.s-hertogenbosch.nl/uploads/media/Onderzoeksrapport_BouwQ.pdf)

Ouwerkerk, Joyce (1995). *De muur tussen koud en warm*. Geraadpleegd op 7 maart 2018, van <https://www.delta.tudelft.nl/article/de-muur-tussen-koud-en-warm>

Park, Tae Won (2011). *Inspection of collapse cause of Sampoong Department Store*.

Geraadpleegd op 8 februari 2018, van

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379073811005275>

Pielkenrood, A.P. (2011). *Beoordeling van kanaalplaatvloeren bij brand*. Geraadpleegd op 16 februari 2018, van <https://www.cementonline.nl/artikel/beoordeling-van-kanaalplaten-bij-brand>

Pope, Roger (2006). *Lessons from Madrid*. Geraadpleegd op 12 februari 2018, van <http://www.carba.co.uk/wp-content/uploads/Lessons-from-Madrid.pdf>

Rijnders, Berjo & Geurtsen, Eva (2011). *Tweede draagweg in de praktijk* (Bachelorscriptie). Bouwkunde, Hogeschool van Arnhem en Nijmegen, Arnhem.

Rijnders, Berjo & Geurtsen, Eva (2012). *Tweede draagweg in de praktijk*. Geraadpleegd op 8 februari 2018, van <https://www.cementonline.nl/artikel/tweede-draagweg-in-de-praktijk>.

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

Taerwe, L. (2006). Brandwerendheid betonconstructies volgens de Eurocodes. *Cement*, 7, 36-42.

Terwel, Karel (2015). Robuustheid is geen unity-check. *Cement*, 4, 4-8.

Tissink, Ad (2005). *Rugdekking nodig voor inbouw tweede draagweg in constructie Vakwerk*. Geraadpleegd op 15 mei 2018, van <https://www.cobouw.nl/bouwbreed/nieuws/2005/06/rugdekking-nodig-voor-inbouw-tweede-draagweg-in-constructie-vakwerk-101172720>

Tromp, A.J. & Van Mierlo, R.J.M. (2014). *Fire Safety Engineering*. Delft: Eburon.

Vambersky, J.N.J.A. & Sagel, R. (1997a). De tikkende tijdbom onder de bouw (I). *Cement*, 3, 24-26.

Vambersky, J.N.J.A. & Sagel, R. (1997b). De tikkende tijdbom onder de bouw (II). *Cement*, 6, 52-53.

Vambersky, J.N.J.A. & Sagel, R. (1997c). De tikkende tijdbom onder de bouw (III). *Cement*, 9, 22-23.

Vambersky, Jan (2015). Robuustheid van constructies. *Cement*, 4, 11-15.

Van Acker, Arnold (2009). Brandveiligheid kanaalplaatvloeren. *Cement*, 7, 10-17.

Van Coile, Ruben (2011). *Brandveiligheid betonelementen*. Geraadpleegd op 16 februari 2018, van <https://www.cementonline.nl/artikel/brandveiligheid-betonelementen>.

Van den Bos, Ab & Joostensz, Ostar (2009). Brandsimulatie op beton. *Cement*, 7, 34-37.

Van den Bossche, G. (2008). Bepaling van de reststerkte van een betonconstructie blootgesteld aan brand. *Cement*, 2, 74-76.

Van der Zanden, J.H. & Van der Zanden, T.P. (1995). Hoofdkantoor Unidek Gemert. *Bouwen met staal*, 123, 40-46.

Van Dijk, Menno (2011). *Voortschrijdende instorting bij betonconstructies* (Masterscriptie). Architecture, Building and Planning, TU/Eindhoven, Eindhoven.

Van Dijk, Menno (2012). *Voortschrijdende instorting*. Geraadpleegd op 8 februari 2018, van <https://www.cementonline.nl/artikel/voortschrijdende-instorting>.

Van Herpen, Ruud (2009). Brandveiligheid hoogbouw. *Cement*, 7, 38-43.

Van Herwijnen, Frans (2009). *Leren van instortingen*. Zoetermeer: Bouwen met staal.

Van Zeeland, H. H. (2003). *Een brandveilig gebouw bouwen*. Den Haag: VNG uitgevers.

Vervuurt, A.H.J.M. & Breunese, A.J. (2006). Spatgedrag van beton bij brand. *Cement*, 7, 70-73.

Vervuurt, Adri & Brekelmans, Jan & Breunese, Arnoud & Erich, Bart (2009). Spatgedrag betonconstructies. *Cement*, 7, 45-49.

Welling, Wim & Van Paassen, Aad (2009). Brand in parkeergarage. *Cement*, 7, 4-8.

Werkgroep constructieve veiligheid, (2011). *Compendium Aanpak Constructieve Veiligheid*.
Rijswijk: QuantasArtoos BV.

Wijte, Simon (2015). Eisen aan robuustheid. *Cement*, 4, 16-22.

Zannoni, M. & Bos, J.G.H. & Engel, K.E. & Rosenthal, U. (2008). *Brand bij Bouwkunde*.

Geraadpleegd op 14 februari 2018, van <https://www.ifv.nl/kennisplein/Documents/20081222-cot-brand-bij-bouwkunde.pdf>

Lijst van figuren

- Figuur 2.1 Het Maanhotel te Heerlen. Overgenomen uit: De Limburger. (2017, 10 juli). *Opdrachtgever: Maanhotel Heerlen wordt gewoon gebouwd*. Geraadpleegd op 31 januari 2018, van https://www.limburger.nl/cnt/dmf20170710_00043208/opdrachtgever-maanhotel-heerlen-wordt-gewoon-gebouwd
- Figuur 3.1 Schema van typen instortingen
- Figuur 3.2 Domino-instorting
- Figuur 3.3 Rits-instorting
- Figuur 3.4 Branddriehoek
- Figuur 3.5 Laminaire diffusievlam. Overgenomen uit: Tromp, A.J. & Van Mierlo, R.J.M. (2014). *Fire Safety Engineering* (2^e gewijzigde druk). Delft: Eburon
- Figuur 3.6 Turbulente diffusievlam. Overgenomen uit: Tromp, A.J. & Van Mierlo, R.J.M. (2014). *Fire Safety Engineering* (2^e gewijzigde druk). Delft: Eburon
- Figuur 3.7 Schematische weergave temperatuurverloop van een binnenbrand. Overgenomen uit: Denoël, J.F. (2006). *Beton en brand*. Aeneas Media
- Figuur 3.8 Schematische weergave schoorsteeneffect en bijbehorende luchtstromingen in een gebouw. Overgenomen uit:
- Figuur 3.9 Temperatuur- en spanningsverdeling in beton bij blootstelling aan brand
- Figuur 3.10 Analyse van elementen, deelsystemen of van constructie als geheel. Overgenomen uit: Denoël, J.F. (2006). *Brandwerendheid van betonconstructies volgens de Eurocodes*. Aeneas Media
- Figuur 3.11 Twee-zone model. Overgenomen uit: Hamerlinck, A.F. (2009) *FSE van constructies in praktisch perspectief*. Geraadpleegd op 11 mei 2018, van <http://www.brandveiligmetstaal.nl/upload/file/r%20hamerlinck%20fse%20perspectief%20en%20praktijk.pdf>

- Figuur 3.12 Één-zone model. Overgenomen uit: Hamerlinck, A.F. (2009) *FSE van constructies in praktisch perspectief*. Geraadpleegd op 11 mei 2018, van <http://www.brandveiligmetstaal.nl/upload/file/r%20hamerlinck%20fse%20perspectief%20en%20praktijk.pdf>
- Figuur 3.13 CFD-model van een brand. Overgenomen uit: Universitat Politècnica de Catalunya (2018). *Research program on compartment fires*. Geraadpleegd op 29 mei 2018, van <https://certec.upc.edu/en/research/fire-in-compartment-research>
- Figuur 3.14 Lokale brand volgens methode Heskestadt. Overgenomen uit: Normcommissie 351 001 "Technische Grondslagen voor Bouwconstructies". (2011, 1 december). *NEN-EN 1991-1-2+C1: Eurocode 1: Belastingen op constructies - Deel 1-2: Algemene belastingen - Belasting bij brand* [NEN Connect]. Geraadpleegd op 23 februari 2018, van <https://connect.nen.nl/Standard/Detail/160413?compId=11921&collectionId=0>
- Figuur 3.15 Lokale brand volgens methode Hasemi. Overgenomen uit: Normcommissie 351 001 "Technische Grondslagen voor Bouwconstructies". (2011, 1 december). *NEN-EN 1991-1-2+C1: Eurocode 1: Belastingen op constructies - Deel 1-2: Algemene belastingen - Belasting bij brand* [NEN Connect]. Geraadpleegd op 23 februari 2018, van <https://connect.nen.nl/Standard/Detail/160413?compId=11921&collectionId=0>
- Figuur 3.16 Schema van ontwerpstrategieën
- Figuur 4.1 Windafdracht van gebouwdeel B
- Figuur 4.2 Doorsnede BB ter hoogte van laag 6 t/m de dakvloer
- Figuur 4.3 Schematische weergave van de draagstructuur van het dak
- Figuur 4.4 Doorsnede BB ter hoogte van laag 6 t/m het dak
- Figuur 4.5 Schematische weergave van de draagstructuur van laag 7
- Figuur 4.6 Doorsnede BB ter hoogte van laag 1 t/m 5
- Figuur 4.7 Schematische weergave van de draagstructuur van laag 1 t/m 6
- Figuur 4.8 Schematisering van het raamwerk ter plaatse van de middenbalk
- Figuur 4.9 Permanente belasting op het raamwerk

Figuur 4.10	Variabele belasting op het raamwerk
Figuur 4.11	Puntlasten op het raamwerk
Figuur 4.12	Knoop in Technosoft
Figuur 4.13	Calamiteitsituatie 1
Figuur 4.14	Plek van de brand in calamiteitsituatie 1 op de plattegrond van laag 1 aangegeven
Figuur 4.15	Calamiteitsituatie 2
Figuur 4.16	Plek van de brand in calamiteitsituatie 2 op de plattegrond van laag 6 aangegeven
Figuur 4.17	Voorbeeld van een gereduceerde doorsnede bij de 500°C-isothermmethode, het gearceerde deel is warmer geworden dan 500°C en vervalt dus in de doorsnede berekening
Figuur 4.18	Werking van trekstaven wanneer er buiging ontstaat
Figuur 4.19	Schoren in het raamwerk voor variant 1
Figuur 4.20	Schoren in het raamwerk voor variant 2
Figuur 4.21	Schoren in het raamwerk voor variant 3
Figuur 4.22	Schematische weergave van de schoorverbinding
Figuur 5.1	Bovenin de momentenlijn zonder steunpuntsmomenten en onderin de momentenlijn met steunpuntsmomenten
Figuur 5.2	Krachtsafdracht voor de tweede draagweg in calamiteitsituatie 1
Figuur 5.3	Krachtsafdracht voor de tweede draagweg in calamiteitsituatie 2
Figuur 5.4	Schematisering van de opleggingen in het raamwerk tijdens calamiteitsituatie 1
Figuur 5.5	Uitsnede van de M-lijn in Technosoft in calamiteitsituatie 1
Figuur 5.6	Uitsnede van de N-lijn in Technosoft in calamiteitsituatie 1

- Figuur 5.7 Uitsnede van de M-lijn in Technosoft in calamiteitsituatie 2
- Figuur 5.8 Uitsnede van de N-lijn in Technosoft in calamiteitsituatie 2
- Figuur 5.9 Te verwachten krachtsafdracht voor de tweede draagweg in calamiteitsituatie 1 voor schoren variant 1
- Figuur 5.10 Te verwachten krachtsafdracht voor de tweede draagweg in calamiteitsituatie 1 voor schoren variant 2
- Figuur 5.11 Te verwachten krachtsafdracht voor de tweede draagweg in calamiteitsituatie 1 voor schoren variant 3
- Figuur 5.12 De schoorconstructie houdt de kolom boven de bezweken kolom omhoog
- Figuur 5.13 Bovenin is een voorbeeld van een dwarskrachtenlijn te zien, ter plaatse van de stippellijn splitst de dwarskrachtwapening zich op

Lijst van tabellen

Tabel 3.1	Overzicht met typen vlammen
Tabel 3.2	Definitie van gevolgklassen. Aangepast overgenomen uit: Normcommissie 351 001 "Technische Grondslagen voor Bouwconstructies". (2011, 1 december). NEN-EN 1990+A1+A1/C2: Eurocode: Grondslagen van het constructief ontwerp [NEN Connect]. Geraadpleegd op 20 februari 2018, van https://connect.nen.nl/Standard/Detail/162984?compld=11921&collectionId=0
Tabel 5.1	Alle krachten in de balken bij de verschillende situaties
Tabel 5.2	Alle krachten in de kolom bij de verschillende situaties
Tabel 5.3	Krachten in de schoren
Tabel 5.4	Vergelijking van de wapening in de balken
Tabel 5.5	Vergelijking van de wapening in de kolommen