

DE TWEEDE DRAAGWEG

ONDERZOEK NAAR PLASTISCHE VERVORMING BIJ BETON BINNEN HET CONSTRUCTIEF
ONTWERP

HOOFDVERSLAG

Suijs, Monica

2084402

Opdrachtgever(s)	:	Volantis B.V. Avans Hogeschool
Bedrijfsbegeleider(s)	:	ing. R.H.B. Bouts ing. G.M.M.G. Sluijsmans
Afstudeerdocent(en)	:	ir. J. Vreede ir. A.W.A.M.J. Van den Bogaard
Afstudeeratelier	:	Constructief ontwerpen BOU
Opleiding	:	Bouwkunde
Documentnummer	:	01
Datum	:	13 juni 2018
Status	:	Definitief
Aantal pagina's	:	83

Voorwoord

Voor u ligt het afstudeeronderzoek 'De tweede draagweg – Onderzoek naar de plastische vervorming bij beton binnen het constructief ontwerp'. Dit afstudeeronderzoek is geschreven in het kader van mijn afstuderen aan de opleiding Bouwkunde aan de Avans Hogeschool te 's-Hertogenbosch en onder begeleiding van stagebedrijf Volantis B.V. Van februari 2018 tot en met juni 2018 ben ik bezig geweest met het afstudeeronderzoek.

Samen met mijn stagebegeleiders vanuit Volantis B.V. , Ruud Bouts en Gemma Sluijsmans, en mijn afstudeerbegeleiders vanuit Avans hogeschool, Johan Vreede en Andre van de Boogaard, hebben ik en Timo Frielink de onderzoeksvraag voor dit afstudeeronderzoek bedacht. Tijdens de afstudeerstage kwamen Timo en ik erachter dat wij ieder een ander einddoel voor ogen hadden en hierop zijn we gesplitst verder gegaan. Met de hulp van Ruud Bouts en Johan Vreede heb ik de onderzoeksvraag aangepast en ben ik hiermee verder gegaan. Tijdens het onderzoek kon ik altijd terecht bij mijn begeleiders met vragen om mij verder te helpen in dit onderzoek.

Bij deze wil ik graag mijn begeleiders vanuit Volantis B.V. bedanken voor de fijne begeleiding en hun ondersteuning tijdens het afstuderen. Ook wil ik mijn afstudeerbegeleiders vanuit Avans Hogeschool bedanken voor hun hulp en ondersteuning.

Tevens wil ik mijn collega's bij Volantis graag bedanken voor de fijne samenwerking. Ik kon aan hen altijd vragen stellen en hulp vragen voor mijn onderzoek.

Tot slot wil ik mijn ouders bedanken. Hun motiverende woorden en morele ondersteuning hebben mij geholpen dit afstudeeronderzoek tot een goed einde te brengen.

Ik wens u veel leesplezier toe.

Venlo, juni 2018



Monica Suijs

Samenvatting

Om instortingen door buitengewone situaties, zoals brand of explosies, te voorkomen is het van belang dat de constructie robuust genoeg is. Het probleem met robuustheid van constructies is dat dit geen 'unity-check' is en het volledig aankomt op de ervaring van een constructeur. Daarom is het belangrijk om meer kennis te verkrijgen over dit complexe onderwerp. In dit onderzoek wordt de focus van dit onderwerp gelegd op de plasticiteit die bij robuustheid een rol speelt.

Het doel van dit onderzoek is om erachter te komen wat de impact van plastische vervorming bij beton is bij een constructie met name tijdens de buitengewone situatie brand. Hiervoor is de volgende hoofdvraag gesteld: Welke impact heeft de plastische vervorming van beton op een constructie bij brand in het hotel van het Maankwartier te Heerlen?

Aan de hand van acht onderzoeksvragen zal er antwoord worden gegeven op de hoofdvraag. Eerst is een literatuuronderzoek gedaan. De kennis die hierbij is opgedaan is toegepast op de casus 'het Maanhotel'. Hierna is een vereenvoudigd ontwerp van de casus gemaakt voor het hoofdonderzoek inclusief alle bijbehorende tekeningen. Vervolgens zijn de plastische berekeningen gemaakt die betrekking hebben op dit onderzoek.

Uit de plastische berekeningen bleek dat de constructie van het Maanhotel voldoende reservedraagvermogen had in een normale situatie. Bij een brand situatie zou dit reservedraagvermogen af nemen en zou de constructie meer spanning ondervinden door hoge temperaturen. De constructie zou dan eerder bezwijken en is misschien wel helemaal niet sterk genoeg. De constructie zou beschermd moeten worden tegen brand door op brand te dimensioneren of tegen brand te bekleden.

Verder bleek uit het literatuuronderzoek naar plasticiteit dat over het onderwerp plasticiteit niet heel veel te vinden valt. Ook is het niet makkelijk om de juiste informatie over plasticiteit te vinden. In internationale onderzoeken is wel steeds meer informatie over plasticiteit te vinden. Er is dus zeker vooruitgang gemaakt op dat gebied.

Op basis van deze conclusies zijn een paar aanbevelingen gemaakt. Ten eerste moet de informatie over plasticiteit in de Eurocode duidelijker en vollediger worden weergegeven, zodat men niet eindeloos hoeft te zoeken naar de juiste manier om plastische berekeningen uit te voeren.

Ten tweede is aanbevolen om de constructie van het Maanhotel te beschermen tegen brand door de constructie te bekleden met brandwerend materiaal. De functionaliteit van het hotel blijft gewaarborgd door geen ruimte te verspillen aan extra grote kolommen en balken in de constructie.

Ten derde wordt aanbevolen om vaker plastische berekeningen te maken. Men kan hierdoor voorspellen hoe een constructie bezwijkt en wat de maximale belasting is die de constructie kan dragen. Ook krijgt men meer inzicht in het gedrag van de constructie.

Summary

In order to prevent collapse due to extraordinary situations, such as fire or explosions, it is important that the construction is robust enough. The problem with robustness of constructions is that this is not a 'unity check' and it fully comes down to the experience of a structural engineer. That is why it is important to gain more knowledge about this complex topic. In this research the focus of this topic is put on the plasticity that plays a role in robustness.

The aim of this research is to find out what the impact of plastic deformation in concrete is on a construction, especially during the extraordinary situation of a fire. The following main question has been asked: What impact does plastic deformation of concrete have on a construction in case of fire in the hotel of the Maankwartier in Heerlen?

The main question will be answered on the basis of eight research questions. A literature study was done first. The knowledge gained with this study is applied to the 'Maanhotel' case. After this a simplified design of the case has been made for the main study including all accompanying drawings. Subsequently, the plastic calculations were made that relate to this research.

The plastic calculations showed that the construction of the Maanhotel had sufficient reserve capacity in a normal situation. In a fire situation this reserve capacity would decrease and the construction would experience more stress due to high temperatures. The construction would then collapse sooner and might not be strong enough at all. The construction should be protected from fire by dimensioning it on fire or by covering it against fire.

Furthermore, the literature study into plasticity showed that there is not much to find about the subject of plasticity. It is also not easy to find the right information about plasticity. However, increasingly more information about plasticity can be found in international studies. So progress has certainly been made in that area.

A few recommendations have been made based on these conclusions. Firstly, the information on plasticity in the Eurocode must be presented more clearly and complete, so that one does not have to search endlessly for the correct way to carry out plastic calculations.

Secondly, it is recommended to protect the construction of the Maanhotel from fire by covering the construction with fire-resistant material. The functionality of the hotel remains guaranteed by not wasting space on extra-large columns and beams in the construction.

Thirdly, it is recommended to make plastic calculations more often. One can predict how a construction collapses and what the maximum load is that the construction can bear. One will also gain more insight into the behaviour of the construction.

Inhoudsopgave

1.	Inleiding.....	1
2.	Afstudeeronderzoek.....	3
2.1.	Doelen en onderzoeksvragen	3
2.2.	Vooronderzoek	3
2.2.1.	Informatie verzamelen	3
2.2.2.	Literatuurstudie vooronderzoek.....	4
2.2.3.	Voorstudie	4
2.2.4.	Casus.....	4
2.3.	Hoofdonderzoek.....	5
2.3.1.	Literatuurstudie hoofdonderzoek	5
2.3.2.	Onderzoek aan de hand van de casus	5
3.	Literatuur- en voorstudies.....	6
3.1.	Literatuurstudie over instortingen.....	6
3.1.1.	Geschiedenis instortingen.....	6
3.1.2.	Typen instortingen.....	9
3.2.	Literatuurstudie over brand.....	11
3.2.1.	Brandfysica	11
3.2.2.	Rook en rookontwikkeling	13
3.2.3.	Vluchten.....	14
3.2.4.	Constructiegedrag bij brand	14
3.3.	Literatuurstudie naar rekenmethodieken bij brand	15
3.3.1.	Prestatiecriteria en procedures voor het constructief ontwerp bij brand	15
3.3.2.	Berekeningsmethoden	16
3.3.3.	Belastingen	19
3.3.4.	Thermische belasting.....	20
3.4.	Literatuurstudie naar de tweede draagweg en alternatieven	24
3.4.1.	Ontwerpstrategieën	24
3.4.2.	Direct	25
3.4.3.	Indirect	26
3.4.4.	Toe te passen strategie bij het hotel van het Maankwartier	26
3.5.	Voorstudie brandveiligheidseisen Maanhotel	27

4.	Uitgangspunten hoofdonderzoek	29
4.1.	Van toepassing zijnde voorschriften.....	29
4.1.	Constructief ontwerp.....	29
4.1.1.	Algemene gegevens van de constructie	29
4.1.2.	Stabiliteit.....	30
4.1.3.	Dakconstructie	31
4.1.4.	Laag 7	34
4.1.5.	Laag 1 t/m 6.....	36
4.1.6.	Begane grond en fundering	37
4.2.	De brandhaard in het Maanhotel.....	38
4.3.	Eisen ten aanzien van de gevolklasse	39
4.3.1.	Betekenis en definitie volgens NEN-EN 1990 en NEN-EN 1991-1-7.....	39
4.3.2.	Aanbevolen strategieën volgens NEN-EN 1991-1-7.....	41
4.3.3.	Strategieën voor buitengewone ontwerpsituaties volgens NEN-EN 1991-1-7.....	41
4.3.4.	Toepassing gevolklasse op het hotel van het Maankwartier.....	42
5.	Hoofdonderzoek	43
5.1.	Plastische vervorming in de Eurocode	43
5.2.	Internationaal onderzoek naar plastische vervorming.....	45
5.2.1.	Damage-plastic model for concrete failure	45
5.2.2.	Computational applications of a coupled plasticity-damage constitutive model for simulating plain concrete fracture	45
5.2.3.	Behaviour of Plain Concrete Beam subjected to Three Point Bending using Concrete Damaged Plasticity (CDP) Model	46
5.2.4.	A plastic-damage model for concrete in fire: Applications in structural fire engineering	46
5.2.5.	Conclusie uit de literatuurstudie	47
5.3.	Plastische vervorming in het Maanhotel	48
5.3.1.	Plastische vervorming van beton.....	48
5.3.2.	Uitgangspunten voor de plastische berekeningen	49
5.3.3.	Plastische vervorming doorsnede middenbalk	53
5.3.4.	Plastische vervorming ligger	55
5.3.5.	Plastische vervorming raamwerk	57
5.3.6.	Bezwijkanalyse raamwerk	61
5.4.	Plastische vervorming en brand.....	65
5.4.1.	Bezwijklast en brand	65

5.4.2. Kolom en balk bij brand	65
5.4.3. Op brand dimensioneren of tegen brand bekleden	67
6. Conclusies en aanbevelingen	68
6.1. Conclusie literatuuronderzoek	68
6.2. Conclusie hoofdonderzoek	68
6.3. Aanbevelingen	70
7. Literatuurlijst en informatiebronnen	71
7.1. Literatuurlijst	71
7.2. Figuren	75
Bijlage A. Constructieve analyse	
Bijlage B. Literatuurstudie	
Bijlage C. Voorstudie	
Bijlage D. Berekeningsrapport	
Bijlage E. Plattegronden, doorsneden en details	

1. Inleiding

Sinds er gebouwd wordt, zijn er gebouwen ingestort. Een voorbeeld hiervan is de gedeeltelijke instorting van de Windsor Tower in Madrid op 12 februari 2005 na een grote brand in het gebouw. Gelukkig vielen hierbij geen slachtoffers. Echter zijn er ook gevallen van instortingen bekend waarbij wel doden en gewonden te betreuren zijn. Het instorten van gebouwen kan allerlei oorzaken hebben. Zo kunnen er tijdens het ontwerpproces of de uitvoering fouten gemaakt zijn. Ook kan een gebouw bezwijken door natuurlijke oorzaken zoals extreme sneeuwval, aardbevingen of storm. Door menselijk ingrijpen, denk hierbij aan bomexplosies, inslag van vliegtuigen, terroristische aanslagen of brandstichting, kunnen bouwwerken instorten. En ook nog door technisch falen zoals een gasexplosie door een gaslek of brand door kortsluiting kan een instorting plaatsvinden.

Bij elke instorting is de ontzetting groot en is de vraag of de norm voor gebouwconstructies niet opgeschroefd moet worden. Er is nu echter al veel regelgeving voor de constructie van een gebouw. Er zijn tegenwoordig al wel gebouwen voorzien van een 'tweede draagweg' waarbij de constructie in geval van nood de krachten van het gebouw via een andere route naar de fundering kan brengen. Er zijn ook maar een paar gevallen bekend waarbij de tweede draagweg zijn meerwaarde bewezen heeft en erge situaties heeft voorkomen. Een reden dat er maar een paar bekend zijn is omdat dit niet opvalt. Een constructie die niet instort is geen vermelding waard. Wat een constructie kan opvangen tijdens een buitengewone situatie heeft te maken met de robuustheid. Het probleem van robuustheid van constructies is dat dit geen 'unity-check' is. Het komt volledig aan op de ervaring van een constructeur. Daarom is het belangrijk om meer kennis te verkrijgen over dit complexe onderwerp.

In dit onderzoek zal naar een specifiek deel van het onderwerp robuustheid worden gekeken, namelijk plasticiteit. Het plastische gedrag van de betonnen constructie van de casus in een brandsituatie zal worden onderzocht. Door naar het plastische gedrag te kijken kan worden onderzocht of de betonnen constructie van de casus sterk genoeg is in een buitengewone situatie zoals brand of een explosie. Door middel van plastische berekeningen en bezwijkanalyses zal het gedrag van de betonnen constructie bepaald worden en wordt duidelijk of er een tweede draagweg nodig is of dat de constructie al sterk genoeg is. Maar om eerst de benodigde kennis te krijgen zal een literatuuronderzoek gedaan worden naar instortingen, brandveiligheid, de tweede draagweg en plasticiteit. Verder zal er een constructieanalyse van de casus uitgevoerd worden. Daarna kunnen aan de hand van de constructie van de casus de benodigde plastische berekeningen en de bezwijkanalyses worden gemaakt.

Het plastische gedrag van beton tijdens een brand situatie is interessant om te onderzoeken omdat het nog niet veel is onderzocht. Er zijn redelijk veel wetenschappelijke artikelen over plasticiteit van beton en ook genoeg wetenschappelijke artikelen over brand en beton. Maar over de combinatie van plasticiteit van beton en brand is niet veel te vinden. Ook wordt er over het algemeen, in de studie of op een ingenieursbureau, niet veel met de plasticiteit van beton gedaan en al helemaal niet veel in combinatie met brand. Toch is het wel een belangrijk onderwerp, aangezien aan de hand van plasticiteit het gedrag van de constructie voorspeld zou kunnen worden in allerlei situaties, zoals bij een brand situatie. Het is daarom belangrijk dat er meer kennis wordt verkregen van plasticiteit en dit ook vaker gebruikt wordt om het gedrag van constructies te voorspellen in verschillende situaties.

Het doel van dit onderzoek is het opstellen van een rapport met conclusies en aanbevelingen. Aan de hand van acht deelvragen over de onderwerpen instorting, brandveiligheid, de tweede draagweg en plasticiteit zal duidelijk worden wat de impact is van de plastische vervorming van beton op een constructie bij brand in het hotel van het Maankwartier te Heerlen.

Het onderzoeksrapport is op een duidelijke manier opgezet. Als eerste wordt in hoofdstuk 2 het afstudeeronderzoek beschreven. De doelen en onderzoeksvragen, het vooronderzoek en het hoofdonderzoek worden hier omschreven.

Als tweede komt de literatuurstudie in hoofdstuk 3 aan bod. Eerst zal in hoofdstuk 3.1 een literatuurstudie gedaan worden over instorting. Hierbij zal gekeken worden naar de geschiedenis van instorting en de verschillende typen instorting. Daarna volgt in hoofdstuk 3.2 een literatuurstudie over brand. De onderwerpen brandfysica, rook en ontwikkeling, vluchten en het constructiegedrag bij brand komen hierbij aan bod.

Vervolgens is er in hoofdstuk 3.3 een kleine literatuurstudie naar de rekenmethodieken bij brand. Hierbij wordt meer kennis verkregen over hoe men een constructie tijdens brand uitrekent. Dan is er in hoofdstuk 3.4 een voorstudie over de brandveiligheidseisen van het Maanhotel. Hierbij wordt eerst kennis opgedaan over de regels en eisen voor brandveiligheid en wordt die kennis daarna toegepast op het Maanhotel.

Daarna zullen in hoofdstuk 4 de uitgangspunten van het hoofdonderzoek worden beschouwd. In hoofdstuk 4.1 wordt het constructief ontwerp besproken. De algemene gegevens van de constructie, de stabiliteit en iedere verdieping van het Maanhotel worden beschreven. Aan de hand van deze gegevens zijn ook de tekeningen gemaakt die in de bijlage te vinden zijn. Verder worden ook de eisen ten aanzien van de gevolklasse besproken in hoofdstuk 4.2.

Dan volgt in hoofdstuk 5 het hoofdonderzoek. Eerst wordt in hoofdstuk 5.1 gekeken naar de plastische vervorming in de Eurocode. Vervolgens wordt in hoofdstuk 5.2 ingegaan op het internationale onderzoek naar plastische vervorming. Daarna wordt in hoofdstuk 5.3 de plastische vervorming in het Maanhotel uitgewerkt. Dan wordt in hoofdstuk 5.4 het verband tussen plastische vervorming en brand omschreven.

Daarna volgen in hoofdstuk 6 de conclusies en aanbevelingen. Per hoofdstuk worden hier de conclusies behandeld en zal een algemene conclusie worden gegeven over dit onderzoek en zullen er aanbevelingen worden gedaan.

Als laatste zijn in hoofdstuk 7 de literatuurlijst en informatiebronnen te vinden.

2. Afstudeeronderzoek

2.1. Doelen en onderzoeksvragen

De robuustheid van constructies is voor veel constructeurs nog een grijs gebied. Robuustheid houdt in dat iets sterk, stevig en veilig is gebouwd. Robuustheid is volgens de Eurocode (NEN-EN 1991-1-7, 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 wanneer is iets robuust genoeg? En wat kan plasticiteit ermee te maken hebben? Deze gedachte is de basis geweest waarop onderzoeksvragen voor dit onderzoek zijn opgesteld.

De onderzoeksvraag luidt:

Welke impact heeft de plastische vervorming van beton op een constructie bij brand in het hotel van het Maankwartier te Heerlen?

Om deze vraag goed te kunnen beantwoorden zijn er ook 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 nu de 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 bekend in de Eurocode over plastische vervorming bij beton?
6. Welk onderzoek is er naar plastische vervorming bij beton gedaan in Nederland en internationaal en wat zijn de belangrijkste conclusies uit deze onderzoeken?
7. Hoe vervormt beton plastisch en wanneer treedt er schade op bij het beton?
8. Wat gebeurt er tijdens brand met de plastische vervorming van beton?

Voor een goed eindresultaat wordt er onderzoek gesplitst in twee verschillende fasen: vooronderzoek en hoofdonderzoek. De eerste vier deelvragen behoren tot het vooronderzoek en de laatste vier tot het hoofdonderzoek.

2.2. Vooronderzoek

In dit hoofdstuk is beschreven wat het vooronderzoek inhoudt. In het vooronderzoek wordt antwoord gegeven op deelvraag 1 tot en met 4. Verder is er een analyse gemaakt van de originele constructie van de casus. Het vooronderzoek is in samenwerking met Timo Frielink gemaakt. Bij de onderzoeken die Timo heeft gedaan staat aangegeven in de inleiding dat dit door Timo Frielink is geschreven.

2.2.1. Informatie verzamelen

Belangrijk voor het hoofdonderzoek is het verzamelen van informatie. Door het vinden van informatie kan er een beter beeld gevormd worden over het onderwerp 'tweede draagweg', maar ook over brand. Hierbij worden er in de bibliotheek literatuur gezocht die relevantie hebben tot dit onderwerp. Daarnaast wordt er ook gezocht naar voorbeeld rapporten van oud-afstudeerders. Deze worden 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.

Verder moet er ook informatie worden verzameld over de casus. Hiervoor worden de originele tekeningen en modellen gebruikt. Met name de constructie van het Maanhotel is belangrijk om te begrijpen. Om duidelijk de informatie van de originele constructie te begrijpen is een constructieanalyse gemaakt. De constructieanalyse is terug te vinden in bijlage A.

2.2.2. Literatuurstudie vooronderzoek

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, wordt deze dan ook opgesplitst in vier 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 in wat brand nu eigenlijk is en wat de gevolgen daarvan zijn zoals rook, vluchten maar ook het gedrag van draagconstructies op brand.
3. Literatuurstudie naar rekenmethoden bij brand: studie naar welke methoden van toepassing zijn wanneer er gerekend wordt op situaties tijdens brand.
4. Literatuurstudie naar de opties voor een 2^e draagweg en de alternatieven: dit onderzoek geeft meer inzicht in de 2^e draagweg en hoe constructies op een andere manier robuust kunnen worden gemaakt.

Deze literatuurstudies zijn opgenomen in bijlage B.

2.2.3. Voorstudie

In de voorstudie wordt er onderzoek gedaan naar brandveiligheid van gebouwen. Het betreft hier voornamelijk regelgeving vanuit het bouwbesluit. Deze regels worden op de casus toegepast. Dit gebeurt door middel van compartimenteringstekeningen en tekeningen waarbij de WBDBO-eisen ingetekend zijn.

De voorstudie en de bijbehorende tekeningen zijn opgenomen in bijlage C.

2.2.4. Casus

In overleg met Volantis is besloten om de kennis uit het onderzoek toe te passen op een casus. Er waren een aantal voorkeuren voor een casus, namelijk: hoogbouw, veel personen aanwezig in het gebouw en personen die het gebouw nog niet goed kennen. Een logiesfunctie heeft deze voorkeur en is er in samenwerking met Volantis een project met een hotel 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 gekozen is om uit te gaan werken. Dit deel is gebouw B, het Maanhotel. Zie figuur 1.

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

De twee kelderlagen worden niet meegenomen in het onderzoek, omdat hier andere brandveiligheidseisen voor zijn dan bij 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 in samenwerking is met de rest van het aanliggende 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.



Figuur 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

De indeling van de architect kan aangepast worden. De keuken kan bijvoorbeeld opgeschoven worden als dat voor de brandhaard beter uitkomt. In het onderzoek wordt alleen deze plek gebruikt voor de berekeningen t.b.v. brand en de tweede draagweg.

De te vereenvoudigde delen van de casus worden uitgewerkt in hoofdstuk 4: ‘Uitgangspunten hoofdonderzoek’ en in bijlage D. De bijbehorende constructieve tekeningen en details vind men in bijlage E. Hoofdstuk 4 is ook nog in samenwerking met Timo Frielink gemaakt. Ook hier staat weer duidelijk aangegeven wat Timo Frielink heeft geschreven.

2.3. Hoofdonderzoek

In dit hoofdstuk is beschreven wat het hoofdonderzoek inhoud. In het hoofdonderzoek wordt antwoord gegeven op deelvraag 5 tot en met 8. In het vooronderzoek is informatie en kennis verzameld wat in het hoofdonderzoek gebruikt kan worden.

2.3.1. Literatuurstudie hoofdonderzoek

In het hoofdonderzoek is ook een literatuurstudie gedaan. Deze literatuurstudie beantwoordt deelvragen 5 en 6. Bij deze literatuurstudie wordt meer kennis verkregen over het onderwerp plasticiteit bij beton. De kennis over plasticiteit is nodig om de overige deelvragen 7 en 8 en de hoofdvraag te kunnen beantwoorden.

2.3.2. Onderzoek aan de hand van de casus

In het hoofdonderzoek wordt verder gekeken naar de casus. De plastische berekeningen worden toegepast op de casus en hierbij kunnen conclusies worden getrokken. Hierbij worden de deelvragen 7 en 8 beantwoord. Alle berekeningen uit dit onderzoek komen uit het berekeningsrapport (bijlage D). In het hoofdonderzoek staan de uitkomsten van bepaalde berekeningen of de belangrijkste berekeningen.

3. Literatuur- en voorstudies

In dit hoofdstuk zijn de literatuurstudie en de voorstudie te vinden. In dit hoofdstuk staan vier literatuurstudie, namelijk de literatuurstudie over instortingen, de literatuurstudie over brand, de literatuurstudie over de rekenmethodieken bij brand en de literatuurstudie naar de tweede draagweg en de alternatieven. Als laatste is de voorstudie naar de brandveiligheidseisen van het Maanhotel te vinden. De literatuurstudie is in samenwerking met Timo Frielink gemaakt.

Van de literatuurstudie over instortingen, de literatuurstudie over brand en de voorstudie zijn alleen de samenvattingen te lezen in dit hoofdstuk. In bijlage B zijn alle literatuurstudies volledig te lezen en in bijlage C is de voorstudie helemaal te vinden met de bijbehorende tekeningen.

3.1. Literatuurstudie over instortingen

De volledige literatuurstudie over dit onderwerp is te vinden in bijlage B01. In dit hoofdverslag vind men de samenvatting van de literatuurstudie.

De literatuurstudie over instortingen gaat over de geschiedenis van ingestorte gebouwen en over de verschillende manieren van instortingen.

3.1.1. Geschiedenis instortingen

Alle instortingen hebben een andere oorzaak, maar toch zijn er gelijkenissen te vinden als je simpelweg kijkt naar de soorten oorzaken voor instortingen benoemd in paragraaf 1.1. van de literatuurstudie over instortingen.

In de studie zit één gebouw dat door ouderdom zou kunnen zijn ingestort. [58] Het hoekpand van de Pearle (figuur 2 en 3) 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.



Figuur 3, Hoekpand Pearle, Overgenomen uit "Den Bosch overweegt kavel ingestort pand te kopen" van De Erfgoedstem, (<https://erfgoedstem.nl/bosch-overweegt-kavel-ingestort-pand-kopen/>), Copyright 2016, De Erfgoedstem



Figuur 2, Instorting Hoekpand Pearle, Overgenomen uit "Instorten Pearle Den Bosch gevolg van fout uit 1992: houten wandje als draagmuur" van T. Spierts, (<http://www.omroepbrabant.nl/?news/252356912/Instorten+Pearle+Den+Bosch+gevolg+van+fout+uit+1992+houten+wandje+als+draagmuur.aspx>), Copyright 2016, Omroep Brabant

Verder waren er ook geen gebouwen die zijn ingestort door natuurlijke oorzaken. [1] Het Hartford Civic Center Arena is wel ingestort door sneeuw op het dak, maar er was in eerste instantie al een ontwerpfout gemaakt. De sneeuwlaag op het dak was namelijk niet abnormaal veel.

[49] Het Murrah Federal Building is de enige in de lijst die door een bomexplosie is ingestort. [1][52][53] De Twin Towers (figuur 4) 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 was voor het instorten. Beide gebouwen hebben dus het menselijke ingrijpen als oorzaak voor het instorten.



Figuur 4, Instorting zuidelijke toren (WTC 2), Overgenomen uit "World Trade Center Building Performance Study: Data Collection, Preliminary Observations, and recommendations" (p. 2-36) door T. McAllister en G. Corley, 2002, Federal Emergency Management Agency, Copyright 2002, Uitgeverij Federal Emergency Management Agency

Er zijn drie gebouwen, binnen dit afstudeeronderzoek, die door een technisch falen zijn ingestort.

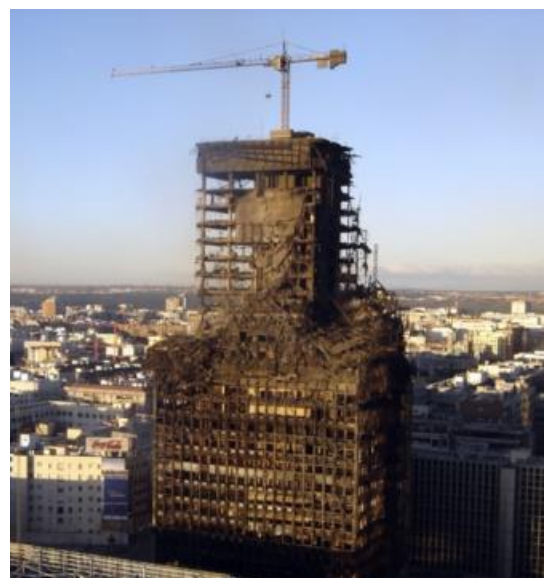
[1] Ronan Point in Londen is door een gasexplosie deels ingestort.

[50][51] Windsor Tower in Madrid (figuur 5) is door brand deels ingestort nadat er kortsluiting was ontstaan in een kantoorkamer.

[2] 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.

[1] 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,



Figuur 5, Gedeeltelijke instorting Windsor Tower, Overgenomen uit "The Windsor Tower Fire, Madrid" van One Stop Shop in Structural Fire Engineering, (<http://www.mace.manchester.ac.uk/project/research/structures/strucfire/CaseStudy/HistoricFires/BuildingFires/default.htm>), Copyright 2018, University of Manchester

waardoor het dak de gewone laag sneeuw al niet aankon. De sneeuw was dus alleen de aanleiding.

[1][48] De loopbrug van het Hyatt Regency Hotel was ingestort door een verkeerde verbinding in de constructie. Dit was dus een ontwerpfout.

[54][55] Het 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.

[1] 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.

[57] Het Rana Plaza was ingestort door meerdere constructieve fouten. Ook hier had de aannemer onder druk van de opdrachtgever meerdere extra verdiepingen gebouwd. Ook waren verkeerde belastingen voor de verdiepingen aangehouden.

[58] 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.

[38] Het MPB van Eindhoven Airport (figuur 6 en 7) was ingestort door een constructieve fout in de vloer.



Figuur 6, MPB Eindhoven Airport in aanbouw, Overgenomen uit "Aangenaam parkeren bij Eindhoven Airport" van BAM Bouw en Techniek, (<https://www.bambouwentechniek.nl/nieuws/2017/5/aangen-aam-parkeren-bij-eindhoven-airport>), Copyright 2017, BAM Bouw en Techniek



Figuur 7, Instorting MPB Eindhoven Airport, Overgenomen uit "Deel nieuwe parkeergarage Eindhoven Airport ingestort" van Studio 040, (<https://www.studio040.nl/deel-nieuwe-parkeergarage-eindhoven-airport-ingestort/content/item?1047859>), Copyright 2017, Studio 040

Uit de deelvraag 'Welke eerdere gevallen van instortingen zijn bekend en wat was de oorzaak?' blijkt dat er in de geschiedenis heel veel 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 namelijk meerdere oorzaken mogelijk voor het instorten van gebouwen. De oorzaken 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.

Opvallend is dat er maar weinig gebouwen (bekend) zijn die door brand zijn ingestort of deels ingestort. Het kan zijn dat er wel meer gevallen van zijn, maar dat ze niet nieuwswaardig waren. Bij de gebouwen, die wel instortte en bekend zijn, waarbij er brand door technische falen was ontstaan was er maar een deel ingestort. Dit deel stortte dan in tot de grond of tot een verstevigde bouwlaag. Een goede tweede draagweg ontbrak bij deze gebouwen.

De meeste gebouwen zijn ingestort door een aaneenschakeling van fouten. Door één van deze fouten weg te nemen, zoals het toevoegen van een tweede draagweg, wordt de kans op instorting verkleind. Het kan zijn 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 als er toch een redelijk deel van de constructie is weggefallen. Uit dit onderzoek blijkt dat de tweede draagweg een belangrijke rol kan spelen bij de veiligheid van een gebouw.

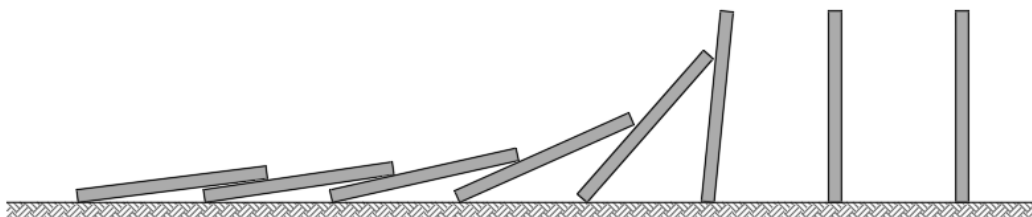
3.1.2. Typen instortingen

Deze paragraaf is geschreven door Timo Frielink. De wijze waarop gebouwen, zoals hierboven beschreven, kunnen instorten, is in te delen in verschillende categorieën. [17][31] Deze is op te delen in vier hoofdcategorieën waarbij twee hoofdcategorieën in te delen zijn in twee subcategorieën. Deze worden allemaal besproken in de literatuur van Starossek.

[9][17][31] De eerste type instorting is de zogenaamde stoot-instorting. Bij een stoot-instorting 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. Vaak is de constructie niet berekend op een dergelijk grote impulsieve kracht, waardoor de constructie kan instorten. De stoot-instorting is in te delen in twee typen, namelijk: pannenkoek- en domino-instorting.

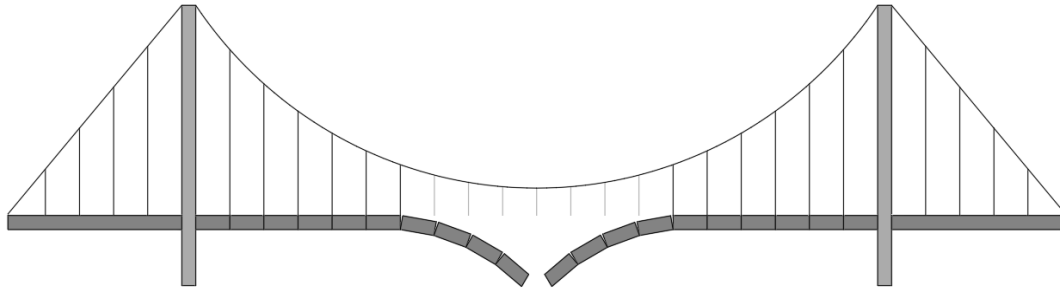
De pannenkoek-instorting is een stoot-instorting in de verticale richting, een voorbeeld hiervan is de instorting van het World Trade Centre te New York in 2001.

Een domino-instorting is een instorting in horizontale richting. Het principe werkt hetzelfde als dominosteentjes die elkaar laten omvallen (zie figuur 8).



Figuur 8, domino-instorting, overgenomen van Timo Frielink, 2018

[9][17][31] De tweede categorie van typen instortingen is de herverdelings-instorting. De naam herverdeling staat voor het feit dat als er een constructief element wegvalt, er belasting moet worden herverdeeld. Als er bijvoorbeeld een kolom wegvalt zal de belasting van die kolom tot zich nam, denk bijvoorbeeld aan de vloerbelasting, over de resterende constructie verdeeld. Op gebouwniveau wordt dat een rits-instorting genoemd. De vorm van een rits is goed te zien in figuur 9. Bij deze hangbrug zijn de hangers bezweken, hierdoor moet het wegdek op een andere manier opgevangen worden. Nu er een aantal wegdekken zijn bezweken is de vorm van een rits goed te zien. In de literatuurstudie in bijlage B01 is dit voorbeeld in stappen uitgelegd.



Figuur 9, rits-instorting, overgenomen van Timo Frielink, 2018

[9][17][31] Op elementniveau wordt een herverdelings-instorting een doorsnede-instorting genoemd. Dit wordt verder in de literatuur weinig beschreven.

Als 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 nooit een constructie die zuiver in te delen valt in een van deze typen instortingen. Er worden altijd meerdere vormen van instortingen gecombineerd. Dit heet een combinatie-instorting.

3.2. Literatuurstudie over brand

In bijlage B02 is de volledige literatuurstudie naar de fysische kant van brand te vinden. Deze literatuurstudie is uitgevoerd om meer kennis te krijgen over brand. Hierdoor kan beter begrepen worden wat een brand veroorzaakt, hoe een brand verspreidt en hoe een brand stopt. Dit hoofdstuk (3.2) is geschreven door Timo Frielink.

3.2.1. Brandfysica

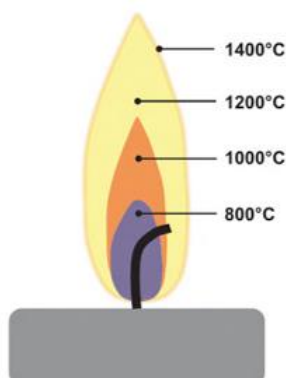
[44] Het belangrijkste voor een verbranding is dat er zuurstof, brandstof en warmte aanwezig is. Dit heet de branddriehoek (zie figuur 10). Wanneer er één van die drie ontbreekt zal er geen verbranding plaatsvinden. Het is dus van belang om één aspect niet te laten toetreden. Ook is de verhouding tussen voornamelijk 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 gecontroleerd aangemaakte verbranding. Indien de verhouding tussen zuurstof en brandstof zo ver afwijkt van de stoichiometrische verhouding, zal er geen verbranding plaatsvinden. 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).



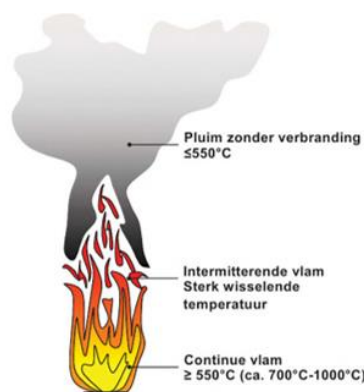
Figuur 10, branddriehoek, overgenomen van Timo Frielink, 2018

[44] Het zichtbare deel van een verbranding is de vlam. De kleur van de vlam wordt bepaald door de energietoestand van de elektronen. Een elektron is een onderdeel van een atoom. De (zichtbare) straling die daarbij vrijkomt is per stof afhankelijk. Bij vlammen zijn er verschillende soorten vlammen. Zo is er een laminaire diffusievlam zoals te zien is in figuur 12. 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 behoorlijk rijk aan brandstof. Daardoor is de verhouding zuurstof-brandstof niet optimaal en is de temperatuur lager. Bij een turbulente diffusievlam (figuur 11) wordt er ook zuurstof van buitenaf in de vlam opgenomen. Echter kan deze zuurstof ook weer uit de vlam geduwd worden. De laatste type vlam is een voorgemengde vlam. Deze is aangepast aan de stoichiometrische verhouding waardoor een goede verbranding ontstaat. Denk aan een

gasfornuis
bijvoorbeeld.



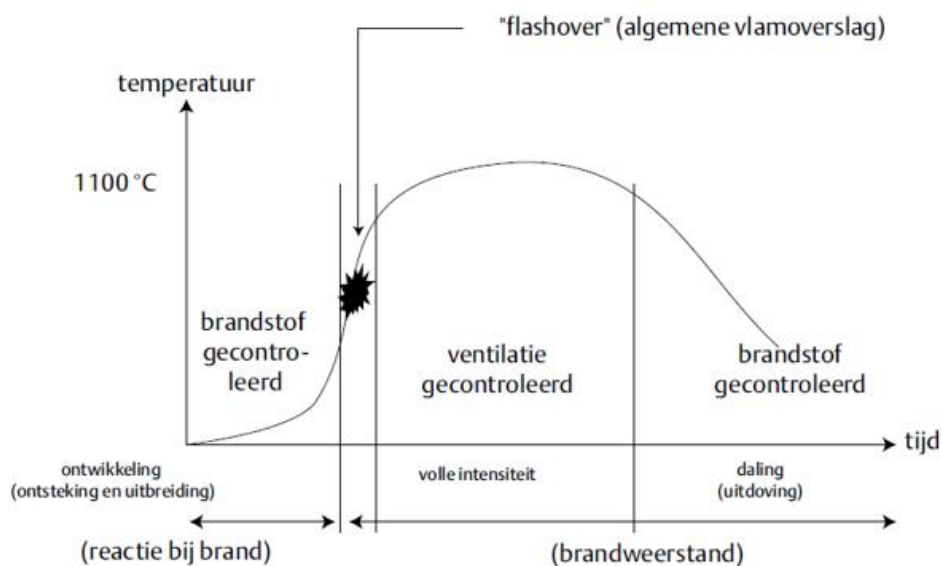
Figuur 12, Laminaire diffusievlam. Overgenomen uit "Fire Safety Engineering" (p. 48) door A.J. Tromp en R.J.M. Van Mierlo, 2013, Delft: Eburon. Copyright 2014, Uitgeverij Eburon



Figuur 11, 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

[44] Elke brandstof heeft een eigen ontbrandingstemperatuur. Hierdoor kunnen stoffen ontbranden na verloop van tijd als de temperatuur boven de ontbrandingstemperatuur komt. Ook kunnen factoren zoals wind daarbij een rol spelen. Als de wind een brand tegen een object aanblaast, kan de ontbrandingstemperatuur van dat object gehaald worden.

[44] De ontbrandingstemperatuur speelt een enorm belangrijke rol bij de ontwikkeling van brand. Wanneer de temperatuur tijdens een binnenbrand wordt uitgezet tegenover de tijd (figuur 13), dan is te zien dat de temperatuur beperkt 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, zal alles ontbranden. Dit heet de 'flash-over'. Wanneer de flash-over plaatsvindt is er geen mogelijkheid meer om te vluchten. Alles is nu aan het branden. Na 80% verbranding zal de dooffase beginnen.



Figuur 13, Schematische weergave temperatuurverloop van een binnenbrand. Overgenomen uit "Beton en brand" door J.F. Denoël, 2006, "Cement 7" (p. 31). Copyright 2013, Aeneas Media

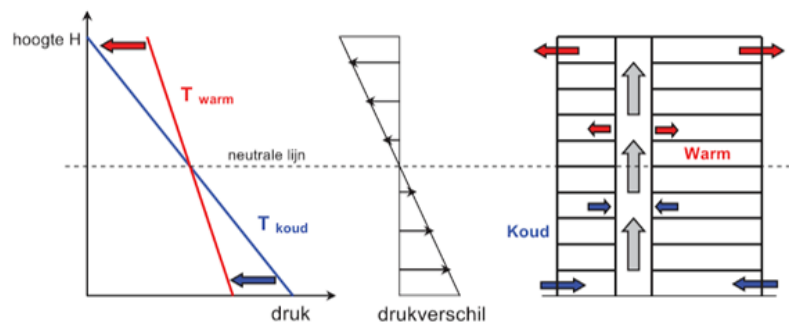
[44][43][66][67][77] Aan de hand van deze schematische weergave zijn brandkrommen opgesteld. Deze kunnen inzicht geven in onder andere de thermische belasting. Dit is dan voornamelijk voor materiaalgedrag en constructiegedrag. Er zijn in de Eurocode norm vier brandkrommen opgenomen: de standaardbrandkromme, gereduceerde brandkromme, koolwaterbrandkromme en de tunnelbrandkromme. De standaardbrandkromme is voor 'normale' gebouwen het meest gebruikelijk.

3.2.2. Rook en rookontwikkeling

[43] Rook zorgt voor de meeste slachtoffers tijdens een brand. Rook is het totale volume waarin lucht en zwevende vaste, vloeibare en gasvormige verbrandingsproducten zitten. Die verbrandingsproducten kunnen giftig zijn. Zo bevat rook het giftige koolstof mono-oxide. Wanneer er te veel van dit gas wordt ingeademd, zal er geen zuurstof meer in het lichaam aanwezig zijn wat tot overlijden leidt. Het gevaar van rook zit in de toxiciteit van de stoffen en het zicht. Wanneer er weinig zicht is door rook wordt vluchten lastig.

[44][72] Belangrijk is dat in een gebouw meerdere factoren die de stroming van rook kunnen beïnvloeden. Zo zal rook vanwege 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. Als laatste treedt er wel volledige menging op tussen rook en omgevingslucht.

[44] De stroming van rook is ook afhankelijk van de situatie. Zo zal rook zich verspreiden met als gevolg dat er stratificatie optreedt. Ook kan er een 'schoorsteen' effect ontstaan. Dit is schematisch weergegeven in figuur 14. Zoals bekend is de dichtheid van warme lucht op grotere hoogte groter dan koude lucht. Op een laag niveau is dit omgedraaid. Hierdoor stijgt warme lucht op. Wanneer er in een gebouw de ruimte is om op te stijgen (aula's, schachten) ontstaat er een stroming. Hierdoor zal de rook zich naar boven verspreiden over het gebouw.



Figuur 14, 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

[44] Ook 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 er niet meer lucht is. Dit heet expansie. Als laatste kunnen installaties invloed uitoefenen op de stroming van rook. Zo zal een mechanische ventilatie rook kunnen sturen.

[44][72] Vanuit menselijk oogpunt is het beste om geen rook in te ademen. Rook bevat dus giftige gassen, maar er is ook minder zuurstof aanwezig. Hierdoor zal vluchten uit de ruimte minder efficiënt zijn. 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 gevolgen van rook precies in te schatten. Het is sowieso lastig om rook in zijn algemeenheid in te schatten. 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.

[44] Een manier die meer voor de hand ligt is een zone-model. 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 en het zicht van de rooklaag berekend worden.

3.2.3. Vluchten

[76][44] Volgens het Bouwbesluit 2012 moet er in elk gebouw zodanige voorzieningen aanwezig zijn dat het ontvluchten van het gebouw goed kan verlopen. 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

[44] Belangrijk is dat er wordt gesproken over draagconstructies. Een constructie kan binnen dit segment ook scheidingsconstructie betekenen. In de literatuurstudie wordt er voornamelijk gekeken naar staal en beton.

[43][44][70] Staal is een geleidend materiaal. Wanneer staal opwarmt zal er over het gehele element dezelfde temperatuur zijn. Het belangrijkste van staal bij brand is de temperatuur die de brand bereikt. Wanneer de temperatuur te hoog wordt, zal de sterkte van het staal afnemen. Dit gebeurt bij ongeveer 400°C. Hierdoor gaat staal eerder dan normaal plastisch vervormen. Dit heeft als nadeel dat er flinke 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.

[27][33][44] Beton is een isolator. Opwarming zal plaatselijk zijn. Hierdoor kunnen er binnenin een betondoorsnede scheuren ontstaan. Dit is na afloop van een brand dan ook moeilijk vast te stellen. Wat verder een punt van aandacht is, is dat beton doordat het een poreus materiaal is 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 zijn gaan vloeien, wat betekent dat er forse vervormingen zijn ontstaan. Verder zijn er bij temperaturen van 400°C chemische processen afgebroken waardoor reparatie of vervanging nodig is. Maatregelen tegen brand zijn grotere dekkingen toepassen en de constructie brandwerend bekleden.

3.3. Literatuurstudie naar rekenmethodieken bij brand

In dit afstudeeronderzoek wordt er gekeken naar manieren om draagconstructies draagkrachtig te houden tijdens brand. Dat is een hele opgave. Gelukkig is er al veel geschreven/onderzocht over brandveiligheid en de invloed daarvan op draagconstructies. Voor het goed uitvoeren van het hoofdonderzoek is het dus van belang om deze literatuur goed te bestuderen. Dit hoofdstuk (3.3) is geschreven door Timo Frielink.

In dit specifieke vooronderzoek wordt er gekeken naar rekenmethodieken voor constructies tijdens brand. Een brand is een buitengewone situatie waar een constructie anders op reageert. Daarnaast gaat het bij een brand erom dat mensenlevens gered worden.

Het lastige aan brand is dat dit moeilijk exact te voorspellen is. De fysische aspecten van brand zijn besproken in de literatuurstudie over brand in hoofdstuk 3.2 en bijlage B02. Ook hoe constructies reageren op brand wordt hierin besproken. Dit stuk gaat dus echt alleen over de manieren waarop je constructies kan uitrekenen tijdens brand en waarbij rekening dient gehouden te worden met bijvoorbeeld een tweede draagweg. Deze regels en methodieken kunnen in het hoofdonderzoek worden toegepast op de casus van het Maankwartier te Heerlen.

In dit onderzoek is de bedoeling om erachter te komen welke regels er zijn voor constructie-elementen en of er te rekenen valt aan de gehele constructie.

3.3.1. Prestatiecriteria en procedures voor het constructief ontwerp bij brand

[77] In afgelopen decennia is de kennis rond het modelleren van een brand zo gegroeid, dat zaken als temperatuurontwikkelingen beter kunnen worden ingeschat. Ook de ontwikkeling van eindige-elementen pakketten heeft hieraan bijgedragen. Door deze ontwikkelingen zijn criteria en ontwerpprocedures opgesteld. Door deze criteria en procedures worden draagconstructies ontwerpen met een aanvaardbare faalkans tijdens brand. Over het algemeen wordt er onderscheid gemaakt tussen de volgende prestatiecriteria:

- 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).

Bouwelementen moeten op de volgende criteria voldoen:

- Enkel scheidende functie: E en I
- Enkel dragende functie: R
- Scheidende en dragende functie: R, E en I

Met deze criteria kan in één oogopslag een waarde gegeven worden aan een element, bijvoorbeeld een dragende wand REI 30. Hierdoor moet deze wand voor 30 minuten aan de criteria R, E en I voldoen.

[66] Met deze gegevens kan er een ontwerpprocedure opgesteld worden. Deze is opgenomen in de NEN-EN 1991-1-2 artikel 2.1:

- 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

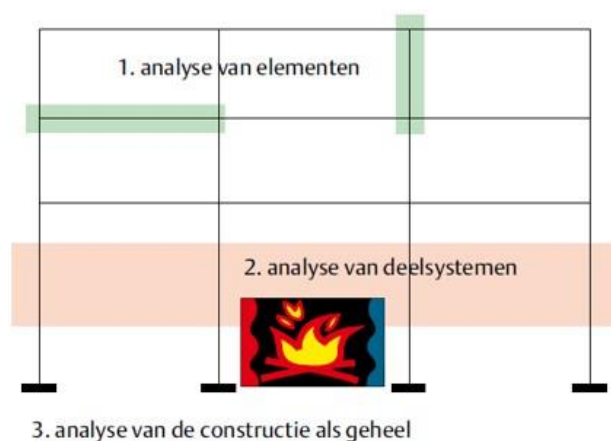
De ontwerpbrand hoeft maar voor één brandcompartiment in een gebouw beschouwd worden. Compartimentering wordt besproken in het vooronderzoek naar brandveiligheidseisen in hoofdstuk 3.5 en bijlage C.

3.3.2. Berekeningsmethoden

[32][34] Voor de berekeningsmethodieken wordt er alleen ingegaan op criterium R. Criterium R gaat ook als enige eis over de draagconstructie en is daardoor voor deze literatuurstudie relevant. Er zijn verschillende methoden om constructie-elementen te ontwerpen/berekenen tijdens brand. Volgens de NEN-EN 1992-1-2 artikel 4.1 zijn dit de volgende methodieken:

- *Tabellen met minimum afmetingen en wapeningsafstanden.* Vooral bedoeld voor in de ontwerpfase. Wanneer er brandveiligheidseisen bekend zijn, kan er aan de hand van randvoorwaarden een minimumafmeting en minimum wapeningsafstand bepaald worden.
- *Vereenvoudigde berekeningsmethoden.* Binnen deze methoden zijn weer drie verschillende manieren mogelijk. De meest voorkomende is een doorsnede-berekening waarbij rekening wordt gehouden met afnemende materiaalsterkte bij hogere temperaturen. Dit is de zogenaamde 500°C-isothermmethode.
- *Geavanceerde berekeningsmethoden.* [79] 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 wordt er zelden een beroep gedaan op deze methode.

Niet elke berekeningsmethode is toepasbaar voor elke situatie. Zo kan de opdracht zijn om de invloed van een brand op de gehele constructie te bepalen. In de norm is een criteriatabel (tabel 1) opgenomen op de volgende bladzijde.



Figuur 15, Analyse van elementen, deelsystemen of van constructie als geheel. Overgenomen uit "Brandwerendheid van betonconstructies volgens de Eurocodes" door J.F. Denoël, 2006, "Cement 7" (p. 38), Copyright 2006, Aeneas Media

	Gegevens in tabelvorm	Eenvoudige berekeningsmethode	Geavanceerde berekeningsmethode
Berekening van een element. Het element is beschouwd als volledig vrijgemaakt van zijn omgeving. Indirecte brandbelastingen zijn niet beschouwd, behalve de belastingen die volgen uit temperatuurverschillen.	Ja Gegevens alleen voor standaardbrand, 5.1(1). In principe kunnen de gegevens ook voor andere brandkrommen zijn ontwikkeld	Ja Standaardbrand en parametrische brand, 4.2.1(1) Temperatuurprofielen zijn alleen gegeven voor standaardbrand, 4.2.2(1) Materiaalmodellen zijn alleen van toepassing op opwarmingssnelheden die vergelijkbaar zijn met die bij een standaardbrand, 4.2.4.1(2)	Ja 4.3.1(1)P Alleen de beginselen zijn gegeven.
Berekening van een constructiedeel. Indirecte brandbelastingen binnen het subonderdeel zijn beschouwd, maar geen tijdsafhankelijk interacties met andere delen van de constructie.	Nee	Ja Standaardbrand en parametrische brand, 4.2.1(1) Temperatuurprofielen zijn alleen gegeven voor standaardbrand, 4.2.2(1) Materiaalmodellen zijn alleen van toepassing op opwarmingssnelheden die vergelijkbaar zijn met die bij een standaardbrand, 4.2.4.1(2)	Ja 4.3.1(1)P Alleen de beginselen zijn gegeven.
Berekening van de constructie geheel. Berekening van de constructie als geheel. Indirecte brandbelastingen zijn beschouwd in de gehele constructie.	Nee	Nee	Ja 4.3.1(1)P Alleen de beginselen zijn gegeven.

Tabel 1, samenvatting van de alternatieve methoden voor het toetsen van de brandwerendheid. Aangepast overgenomen uit 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 29 maart 2018, van <https://connect.nen.nl/Standard/Detail/158489?compId=11921&collectionId=0>

500°C-isothermmethode

In het hoofdonderzoek zullen er elementen worden berekend op een bijzondere combinatie. Deze bijzondere combinatie is brand. Voor het berekenen van constructie tijdens brand zijn meerdere methoden mogelijk. Deze zijn eerder in dit hoofdstuk benoemd. Uiteindelijk zal de 500°C-isothermmethode beschouwd worden. Om deze goed toe te kunnen passen wordt deze hieronder nader uitgelegd.

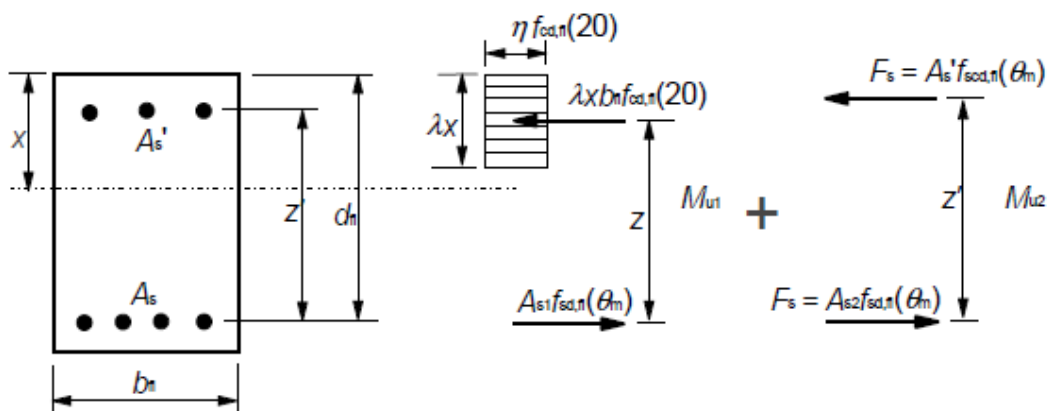
[32] De 500°C-isothermmethode is een manier om een deel van constructie op brand te berekenen. De methode gaat ervan uit dat het beton, dat in de doorsnede van het element een hogere temperatuur heeft dan 500°C, geen bijdrage levert aan de sterkte en stijfheid van het element. Het resterende deel van de doorsnede wordt niet warmer dan 500°C. Hiervan mag aangenomen worden dat deze de oorspronkelijke sterkte en stijfheid behoudt.

Wanneer de wapening buiten de branddoorsnede valt, mag er ook vanuit worden gegaan dat deze een bijdrage levert aan de sterkte van het element. De sterkte van het wapeningstaal moet nog wel gereduceerd worden met een formule die afhankelijk is van de staaltemperatuur. Deze is terug te vinden in NEN-EN 1992-1-2 artikel 4.2.4.3.

Voor berekeningen met de 500°C-isotherm-methode mogen alle materiaalfactoren $\gamma_{M,fi}$, $\gamma_{s,fi}$ en $\gamma_{c,fi}$ op 1,0 gezet worden in plaats van 1,15 en 1,50. Daarnaast hoeft er geen rekening gehouden te worden met kruip. Kruip is een verschijnsel dat over een lange periode verspreid, terwijl een brand een korte aangelegenheid is.

Als eerste stap moet er in de doorsnede bepaald worden waar de temperatuur hoger is dan 500°C. Dat kan door middel van bijlage A in de NEN-EN 1992-1-2. Hier staan een aantal grafieken voor specifieke doorsnedes waaruit de afstand af te lezen is bij 500°C. Het is ook mogelijk om die afstand handmatig te berekenen, echter is dat vanwege complexiteit buiten beschouwing gelaten.

Na deze stap wordt de normaalkracht en het tweede orde-moment bepaald in de bijzondere combinatie. De GTB-tabellen voor kolomwapening zijn niet toepasbaar voor de 500°C-isothermmethode. Daarom moet er een handberekening gemaakt worden via figuur 16. Figuur 16 is terug te vinden in NEN-EN 1992-1-2 bijlage B.



Figuur 16, Berekening van het draagvermogen van een dwarsdoorsnede. Overgenomen uit 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 10 mei 2018, van <https://connect.nen.nl/Standard/Detail/158489?compId=11921&collectionId=0>

3.3.3. Belastingen

Zoals te zien is in de ontwerpprocedure van Eurocode (pagina 14) dient er rekening gehouden te worden met twee typen belastingen:

- Mechanische belasting
- Thermische belasting

Deze twee typen van belastingen worden in dit hoofdstuk behandeld.

Mechanische belasting

[34][79] Mechanische belasting is belangrijk om het belastingniveau vast te stellen. Dit is in een normale ontwerpsituatie niet anders en voor brand wordt hier geen uitzondering voor gemaakt. Nu valt de belasting waarop gerekend wordt bij een normale situatie onder permanente en variabele belasting. Brand valt onder de categorie buitengewone belastingen. Hieronder valt bijvoorbeeld ook aanrijdingen en explosies. Echter is er voor belasting bij brand een apart deel in de Eurocode opgenomen (NEN-EN 1991-1-2). Voor andere buitengewone belastingen is een apart deel gemaakt (NEN-EN 1991-1-7).

Belastingcombinaties

[34][65][79] De karakteristieke belastingen zelf zijn tijdens brand niet anders dan tijdens de normaal gebruik. Het verschil in belastingen wordt tijdens brand gemaakt door andere belastingcombinaties. Bij belastingcombinaties worden karakteristieke belastingen vermenigvuldigd met belastingfactoren en Ψ -factoren. De twee combinaties volgens de uiterste grenstoestand zijn:

$$E_d = \gamma_G \times G_K + \gamma_Q \times \Psi_0 \times Q_K \quad (6.10a)$$

$$E_d = \xi \gamma_G \times G_K + \gamma_Q \times Q_K \quad (6.10b)$$

Bij brand gelden er andere combinaties. Volgens NEN-EN 1990 artikel 6.4.3.3. moet er bij een buitengewone belastingssituatie de volgende combinatie aangehouden worden:

$$E_d = G_K + A_d + \Psi_2 \times Q_K \quad (6.11b)$$

Met:

E_d = rekenwaarde van belastingeffect

G_K = karakteristieke waarde van een blijvende belasting

A_d = rekenwaarde van een buitengewone belasting

Q_K = karakteristieke waarde van een enkelvoudige variabele belasting

Ψ_2 = factor in verband met de quasi-blijvende waarde van een veranderlijke belasting

De Ψ -factoren zijn te vinden in tabel NB.2. uit de NEN-EN 1990/NB.

Indirecte belastingen

[34][66] Vanwege brand kan materiaal gaan uitzetten. Dit is aan bod gekomen in de literatuurstudie over brand. Op het moment dat er geen of te weinig mogelijkheden zijn om uit te zetten, zal er extra belasting/spanning ontstaan. Dit effect moet meegenomen worden in de belastingcombinatie. Dat is in formule 6.11b de A_d . Het effect van A_d mag achterwege gelaten worden indien:

- Vooraf kan worden aangenomen dat zij een verwaarloosbaar of gunstig effect hebben
- Daarmee al rekening is gehouden door conservatieve schematisering van de opleggingen en randvoorwaarden, en/of impliciet beschouwd door conservatieve brandveiligheidseisen

Wanneer dit niet het geval is zal er bij het bepalen van A_d rekening gehouden moeten worden met:

- De verandering van de thermische uitzetting van elementen
- De ongelijkmatige uitzetting van statisch onbepaalde elementen
- Inwendige spanningen
- Thermische uitzetting van aangrenzende elementen
- Thermische uitzetting van elementen die van invloed is op andere elementen buiten het brandcompartiment

De indirecte belastingen zijn moeilijk in kaart te brengen. Dit is alleen nuttig wanneer de constructie als geheel wordt uitgerekend. Hierbij is wel enige expertise nodig om dat goed uit te voeren.

3.3.4. Thermische belasting

De thermische belasting is de belasting op een draagconstructie die bepaald wordt door de nettowarmtestroomdichtheid op de elementen [66]. De nettowarmtestroomdichtheid is energie, per eenheid van tijd en oppervlakte, geabsorbeerd door elementen. De nettowarmtestroomdichtheid h_{net} wordt uitgedrukt in W/m^2 op het oppervlak van het element.

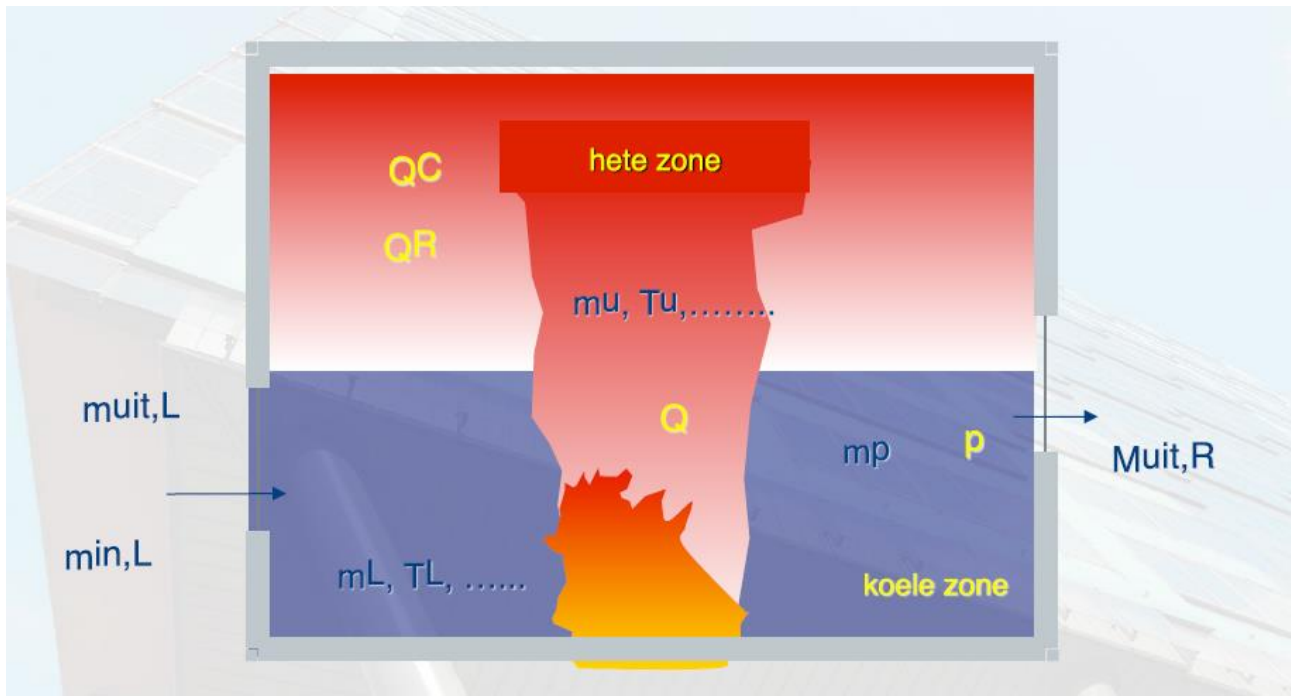
[43] De thermische belasting op een draagstructuur is sterk afhankelijk van het verloop van de brandtemperatuur. Vaak wordt hiervoor de standaard brandkromme (zie Literatuurstudie over brand) gebruikt. Deze is opgenomen in de Eurocode en is daarom geldig voor het constructief ontwerp van een gebouw. Een werkelijke brand kan afwijken van de standaard brandkromme, simpelweg omdat de brandkromme een aanname is.

Daarnaast is het in bepaalde gevallen zeker de moeite om de temperatuurlast via modellen te bepalen. Dit heeft er mee te maken dat constructieve elementen, bijvoorbeeld in een grote open ruimte, mogelijk een lage vuurlast hebben. Daardoor is in werkelijkheid de temperatuur in het brandcompartiment lager dan tijdens een standaardbrand.

Factoren die invloed hebben op het werkelijke gedrag van een brand zijn:

- De verdeling van het brandbare materiaal
- De verbrandingssnelheid van de brandbare materialen
- De ventilatiemogelijkheden

- De geometrie van het brand(sub)compartiment
- De thermische eigenschappen van de omringende wanden



Figuur 17, 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

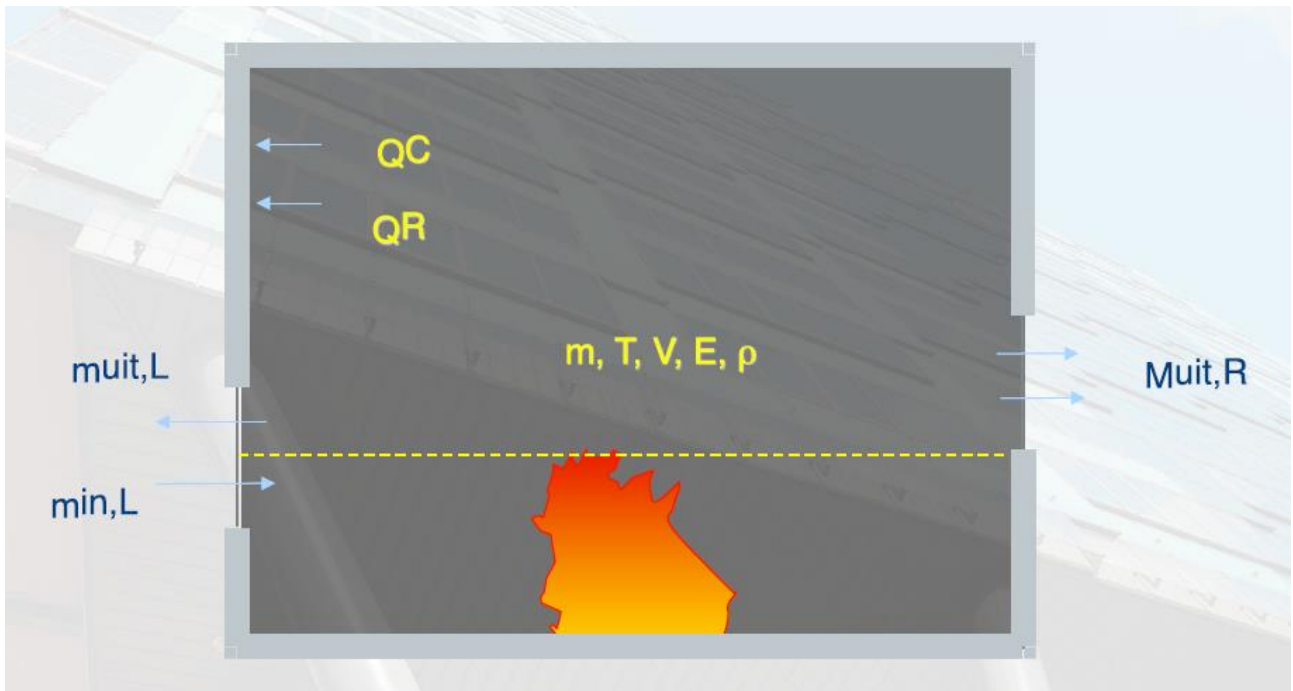
Zone modellen

Een zone model is een manier om specifiek het temperatuurverloop in het brandcompartiment te kunnen bepalen. Bij zone-modellen wordt ervan uitgegaan dat wanneer er brand ontstaat, de massa en energie behouden blijven [34]. Hierbij is dus de temperatuur overal constant in de ruimte. Er kan ook gekozen worden voor een twee-zone model, waarbij het brandcompartiment opgesplitst is in twee zones, zoals in figuur 17 op de vorige pagina. Hierbij is de zone rond de brand de koude zone, en de zone bovenin de ruimte een hete zone. Hoe langer de brand duurt, hoe groter de hete zone zal worden. Dit principe is eerder ook uitgelegd in de literatuurstudie naar brand.

Wanneer de brand vanuit de groeifase overgaat in de volledige ontwikkelde brand, er vindt een flashover plaats, zal een twee-zone model overgaan in een een-zone model. Dat betekent dat er een gelijkmatig verdeelde temperatuur in het brandcompartiment aanwezig is.

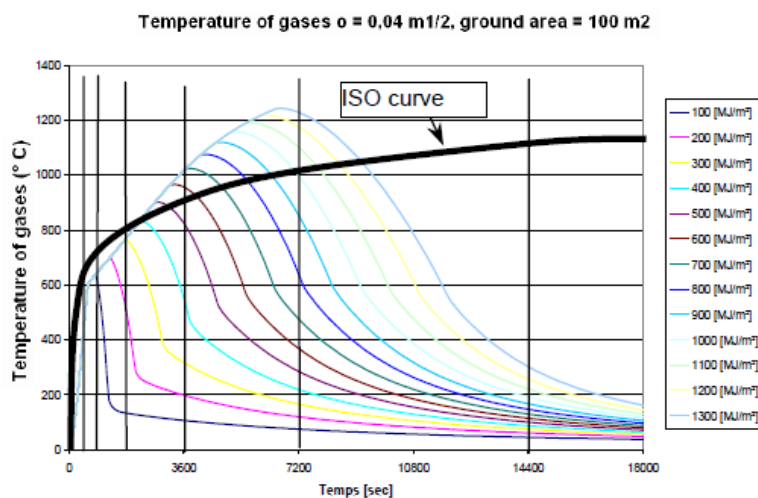
De keuze voor een een-zone of twee-zone model is afhankelijk van het gebouw. Bij een kleine compartimentering wordt er gerekend van een twee- naar een-zone model, maar bij grote compartimenten is het noodzakelijk om met een twee-zone model te rekenen.

De koude zone van een twee-zone model is vrij van verbrandingsgassen en is daarom van belang voor het bepalen van de overlevingskansen van de aanwezige personen in het brandcompartiment [79].



Figuur 18, Een-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

Er valt door gebruik te maken van zone modellen meer te zeggen over het temperatuurverloop. Aan de hand van die gegevens kunnen er ook specifieke brandkrommen gemaakt worden die verschillen van de standaard brandkromme. Dit is in figuur 19 te zien. De ISO-curve is de standaard brandkromme. De overige krommen zijn bepaald per vuurlast aan de hand van een één-zone model [79]. Het is hiermee zeker mogelijk om een beter beeld te krijgen van de werkelijke temperatuurverloop, al is de werkelijkheid nog steeds niet 100% zeker te voorspellen.



Figuur 19, Voorbeeld van kromme bekomen via een zonemodel voor verschillende rekenwaarden van de brandbelasting q_{fd} . Overgenomen uit "Brandveiligheid en betonconstructies" door J.F. Denoël, 2007 (http://www.febelcem.be/fileadmin/user_upload/autres-publications/nl/docref_feu_nl.pdf). Copyright 2007, FEBELCEM

Veldmodellen

[79] Veldmodellen zijn CFD-modellen. Dit is een zeer geavanceerde manier van het bepalen van de vuurlast. Deze zijn zeer complex en vereisen een grote hoeveelheid voorkennis. Daarnaast zijn veldmodellen heel erg afhankelijk van uitgangshypothesen en daarom moeilijk in gebruik. Een CFD-model maakt een thermodynamische en aerodynamische differentiaalvergelijking, die op een zeer groot aantal punten in het brandcompartiment opgelost wordt, waarmee de temperatuur en de snelheidscomponenten van de rookgassen bepaald kunnen worden per plek. Dit is voor een 'normaal' project niet relevant en wordt voornamelijk gebruikt voor onderzoeken naar de verspreiding en warmte van rook.

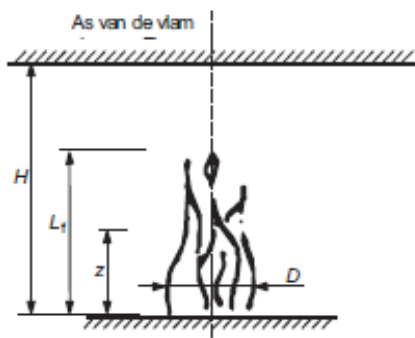
Modellen van gelokaliseerde branden

[34][79] Het is ook mogelijk om via de Eurocode lokaal de temperatuurstijging te berekenen bij een lokale brand. Bij een lokale brand wordt er niet uitgegaan van een temperatuur die overal in het compartiment aanwezig is. Er mag alleen gerekend worden aan een lokale brand als er geen kans is op vlamoverslag. Dit is vaak bij grote compartimenten vaak reëel om te doen. De Eurocode onderscheidt twee verschillende modellen van lokale branden. Het eerste model is de methode van Heskestadt. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat als de vlam het plafond niet raakt, of als er een brand is in de open lucht, mag er van deze methode gebruikt gemaakt worden. De temperatuur is dan te berekenen via de volgende formule:

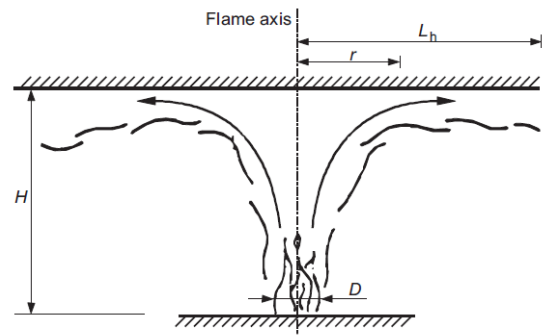
$$\theta_{(z)} = 20 + 0,25Q_c^{\frac{2}{3}}(z - z_0)^{-5/3} \leq 900, \text{ in } ^\circ\text{C} \quad (\text{C.2})$$

- D = de diameter van de brandhaard, in m, zie figuur 20
- Q = de brandvermogensdichtheid (vermogen van de vrijkomende warmte van de brand), in W, volgens E.4
- Q_c = het aandeel van convectie in de brandvermogensdichtheid, in W, met $Q_c = 0,8 Q$ als standaardwaarde
- z = de hoogte, in m, langs de as van de vlam, zie figuur 20
- H = de afstand, in m, tussen de brandhaard en het plafond, zie figuur 20

Er is ook een andere methode om de temperatuur te berekenen van een lokale brand. Dat is de methode Hasemi. Bij deze methode wordt ervan uitgegaan dat de vlam wel het plafond raakt, zoals te zien is in figuur 21.



Figuur 20, 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?compId=11921&collectionId=0>



Figuur 21, Lokale brand volgens 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?compId=11921&collectionId=0>

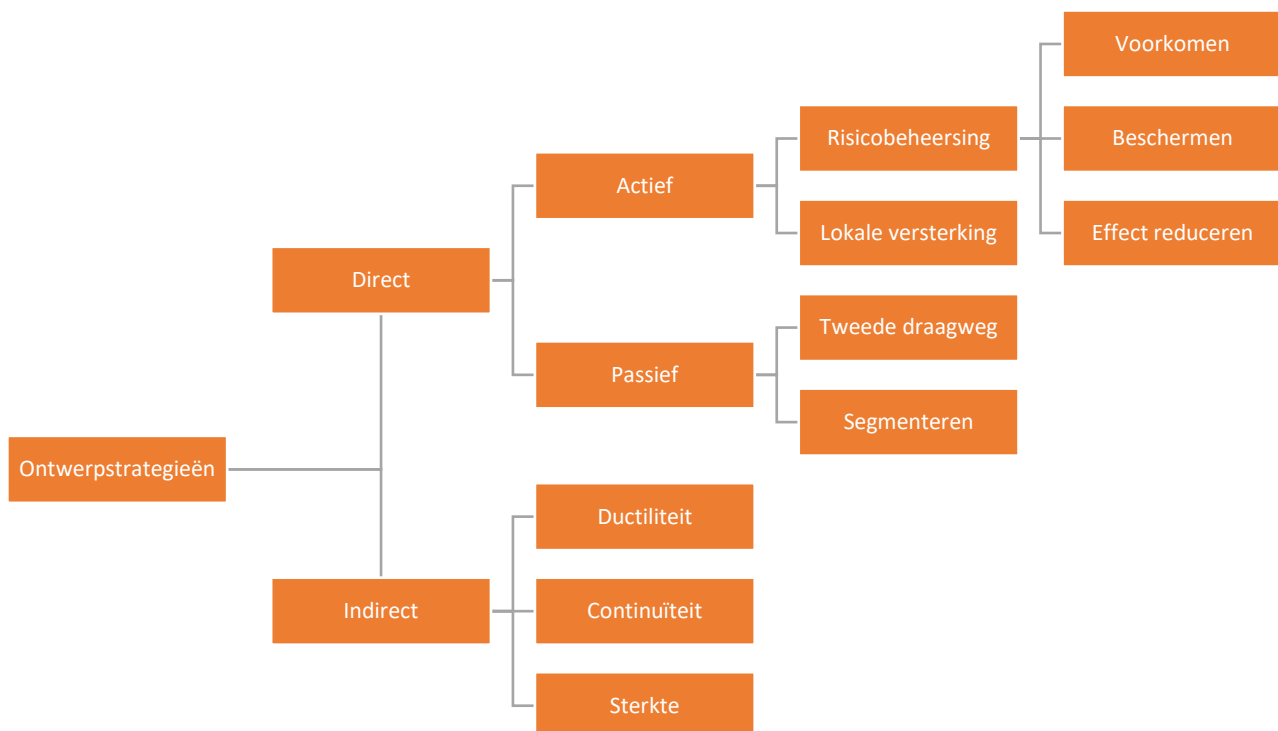
3.4. Literatuurstudie naar de tweede draagweg en alternatieven

[65][68] Om te zorgen dat een gebouw niet instort zijn er diverse mogelijkheden die gebruikt kunnen worden. In deze literatuurstudie wordt gekeken naar deze verschillende mogelijkheden. Deze mogelijkheden komen voort uit ontwerpstrategieën die afkomstig zijn van de verschillende gevolgklassen uit de Eurocode. Pas wanneer je de verschillende ontwerpstrategieën weet kan je een goede keuze maken voor een constructief ontwerp tegen instorting. Hierbij kan gebruikt worden gemaakt van een tweede draagweg, een alternatief voor een tweede draagweg of een combinatie van beide. In de volgende deelhoofdstukken worden de verschillende ontwerpstrategieën besproken.

3.4.1. Ontwerpstrategieën

De ontwerpstrategieën zijn afkomstig uit de gevolgklassen uit de Eurocode. Verderop in hoofdstuk 4.3 staat kort wat deze ontwerpstrategieën per gevolgklasse inhouden en welke van toepassing is op het hotel uit ons onderzoek. Als we dieper naar de verschillende ontwerpstrategieën kijken kunnen we beter begrijpen wat deze strategieën inhouden en hoe we deze optimaal kunnen toepassen. Hierdoor kunnen we ook beter een oplossing tegen eventueel instorten bedenken.

[9][84][17] De verschillende ontwerpstrategieën zijn in te delen in een schema zoals in figuur 22 hieronder.



Figuur 22, Ontwerpstrategieën

3.4.2. Direct

[9][84][17] De directe strategie is ingedeeld in twee strategieën: de actieve strategie en de passieve strategie. Bij de directe strategie wordt er gekeken naar wat er met de constructie gebeurt bij een buitengewone situatie en hoe deze buitengewone situatie vermeden of gereduceerd kan worden. De actieve strategie is een strategie die eigenlijk alleen toegepast dient te worden bij gevolgklasse CC3. De passieve strategie kan worden gekozen om toe te passen bij gevolgklasse CC2b. Natuurlijk is het altijd mogelijk om een strategie uit een hogere gevolgklasse toe te passen bij een gebouw met een lagere gevolgklasse als je denkt dat dat een beter constructief ontwerp oplevert.

Actief

[9][84][17] De actieve strategieën zijn gebaseerd op aannames voor het gebouw en de omgeving. Risicobeheersing en lokale element versterking zijn hierbij van toepassing. De constructie wordt hierbij niet robuuster. Het is een minder goede maatregel om een gebouw tegen voortschrijdende instorting te beschermen.

- **Risicobeheersing**
Er zijn 3 manieren bij de risicobeheersing. De eerste manier is het verwijderen van het risico. De tweede manier is om met bepaalde voorzieningen de constructie te beschermen tegen het risico. En de laatste is het effect van de onvoorziene gebeurtenis reduceren door bepaalde maatregelen te nemen. Risicobeheersing is echter een slechte methode, aangezien niet alle onvoorziene gebeurtenissen bekend zijn en te voorspellen zijn.
- **Lokale element versterking**
Bepaalde elementen waarbij het risico op beschadiging en instorting groter is dan bij de rest van de constructie worden hierbij versterkt. Deze elementen zijn over het algemeen een 'kritisch element', zoals verder te lezen is in paragraaf Kritisch element. De robuustheid van de constructie wordt echter niet vergroot.

Passief

[9][84][17][85] Bij de passieve strategie wordt er gekeken hoe de constructie zich houdt als er een element wegvalt en hoe de gevolgen van deze element verwijdering beperkt kunnen blijven. Bij deze strategie wordt er gekeken naar de tweede draagweg en naar segmentering van het gebouw. Plaatselijke schade wordt hierbij geaccepteerd.

- **Tweede draagweg**
De tweede draagweg vangt de belasting, die op het weggefallen element stond, op door de deze af te leiden naar omliggende elementen. Met relatief makkelijke oplossingen kan een tweede draagweg gemaakt worden. Het doel bij de tweede draagweg is het beperken van de schade, materieel en menselijk.
- **Segmentering**
Bij segmentering mag een deel van de constructie instorten als dit niet disproportioneel is ten opzichte van de rest van de constructie. De instorting stopt bij de segmentgrens door het juist toepassen van ductiliteit, sterkte en continuïteit. De robuustheid van de constructie wordt bij deze strategie vergroot en dus ook de weerstand tegen het instorten van de constructie.

Kritisch element

[9][34][85] Als het denkbeeldig wegvallen van een constructief element als gevolg heeft dat meer dan 15% of 100 m² van het vloeroppervlak beschadigt raakt dan spreekt men volgens de Eurocode van een kritisch element.

Een kritisch element is zodanig ontworpen dat het een buitengewone belasting A_d van 34 kN/m^2 kan opnemen in iedere willekeurige richting.

3.4.3. Indirect

[9][84][17][85] De indirecte strategie is gebaseerd op ontwerpregels. Deze ontwerpregels stellen minimale eisen aan ductiliteit, sterkte en continuïteit. De indirecte strategie kan relatief snel worden uitgevoerd en is projectonafhankelijk. De aanpak is echter meer geschikt voor de standaardspecificaties. De indirecte strategie dient bij alle gevolklassen te worden toegepast.

- **Ductiliteit**
Ductiliteit garandeert een bepaalde capaciteit tot plastisch vervormen. Deze plastische vervorming kan energie onttrekken. In een catastrofale gebeurtenis moeten de elementen en de verbindingen hun sterkte behouden bij grote vervormingen.
- **Continuïteit**
Continuïteit zorgt ervoor dat belastingen kunnen worden overgedragen van het ene element naar het andere wanneer een element bezwijkt.
- **Sterkte**
De eisen voor sterkte zorgen ervoor dat een element minimaal de voorgeschreven belasting kan dragen. Ook zorgen de eisen ervoor dat de verbindingen tussen elementen de minimale belastingen aankunnen.

3.4.4. Toe te passen strategie bij het hotel van het Maankwartier

In hoofdstuk 4.3 van het hoofdverslag is te lezen dat het hotel valt onder gevolgklasse CC2b. Er is gekozen om in dit onderzoek de strategie toe te passen waarbij eerst wordt gekeken naar de ductiliteit van de constructie. Het doel hierbij is om erachter te komen of de constructie voldoende ductiliteit heeft om plastisch te vervormen. Hierna zou voor verder onderzoek voor de directe passieve strategie, waarbij denkbeeldig een voor een dragende elementen worden verwijderd, kunnen worden gekozen. De ontwerpstrategieën die bij deze gevolgklasse toegepast moeten worden zijn de directe passieve strategie en de indirecte strategie.

Het is het slimste als de indirecte strategie als eerste toegepast wordt zodat er al een degelijk constructief ontwerp is. De constructie moet volgens de ontwerpregels uit de Eurocode worden ontworpen voor voldoende stabiliteit bij normaal gebruik. Voor het hotel is al een constructie ontworpen en berekend dat voldoende stabiel is. Voor dit onderzoek is deze constructie vereenvoudigd en het deel wat onderzocht wordt is opnieuw berekend op voldoende stabiliteit bij normaal gebruik. Deze berekeningen zijn terug te vinden in bijlage D. In dit onderzoek wordt dieper ingegaan op de ductiliteit uit de indirecte strategie.

De directe passieve strategie kan dan voor verder onderzoek als tweede worden toegepast op het constructieve ontwerp. Onderzocht kan worden hoe de constructie zich houdt ten opzichte van de normale situatie. Wanneer de constructie niet meer zou blijven staan kan er gekeken worden naar andere strategieën voor een tweede draagweg.

3.5. Voorstudie brandveiligheidseisen Maanhotel

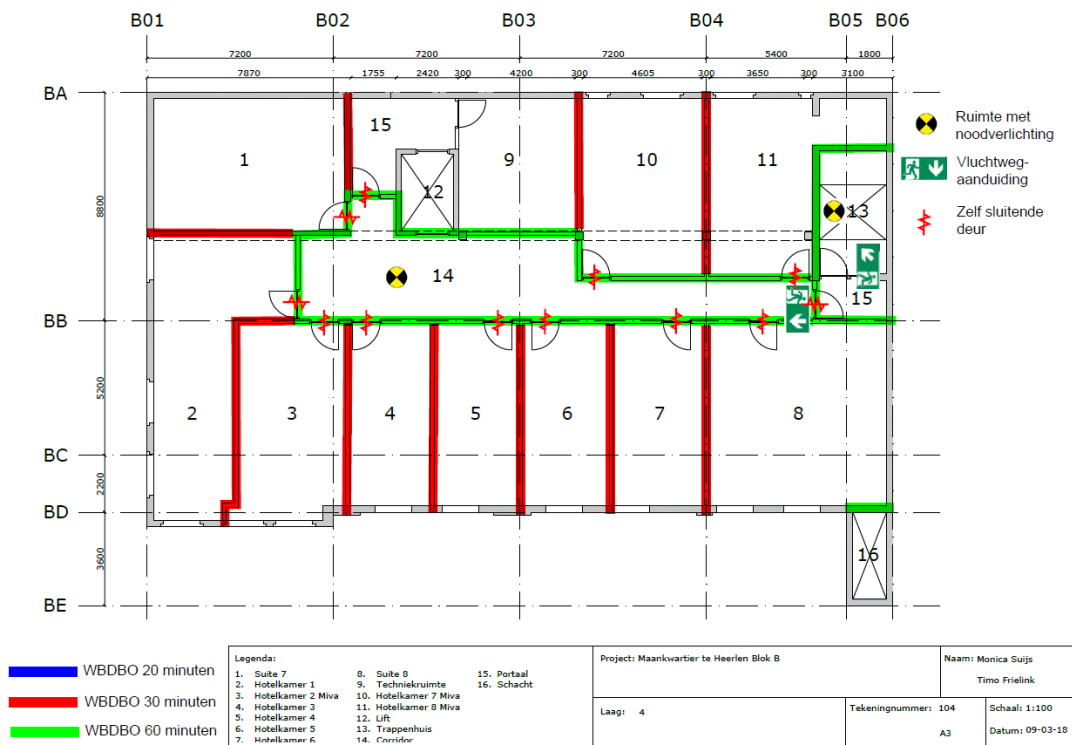
Deze voorstudie is gedaan om meer inzicht te krijgen in de brandveiligheidseisen uit het bouwbesluit. De kennis die hierbij is opgedaan is toegepast op de casus, het Maanhotel. In bijlage C01 vind men alle brandveiligheidseisen samen met de bijbehorende tekeningen.

[76] Aan de hand van het Bouwbesluit 2012 nieuwbouw zijn de brandveiligheidseisen van het hotel van het Maankwartier te Heerlen opgesteld. In de bijlage is de hele voorstudie over de brandveiligheidseisen van het hotel van het Maankwartier te lezen en zijn ook de plattegronden met brandcompartimenten en WBDobo-eisen te vinden. Hieronder is een samenvatting van deze voorstudie te lezen.

[76] Het hotel van het Maankwartier heeft voornamelijk logiesfuncties, maar er zijn ook een aantal andere functies. Deze andere functies zijn: bijeenkomstfunctie, sportfunctie, kantoorfunctie en overige gebruiksfuncties. Deze verschillende functies hebben invloed op de brandveiligheidseisen van het hotel.

[76] De sterkte van de constructie is afhankelijk van de hoogte van het hotel. Het hotel is meer dan 13 meter hoog en heeft dus een brandwerendheid, met betrekking tot bezwijken, van minimaal 120 minuten.

[76] In het hotel moeten ook brandcompartimenten zitten voor de brandveiligheid. Iedere hotelkamer en suite is een beschermd subbrandcompartiment en subbrandcompartiment die een WBDobo eis hebben van minimaal 30 minuten. Alle overige ruimtes op iedere verdieping met hotelkamers vormen samen een subbrandcompartiment en iedere verdieping met hotelkamers is een brandcompartiment (zie figuur 23). Laag 1 en 2 van het hotel vormen samen een subbrandcompartiment en brandcompartiment en op de begane grond vormt de technische ruimte een apart brandcompartiment. Het trappenhuis en de extra beschermde vluchtroutes op de verdiepingen met hotelkamers bevinden zich niet in een brandcompartiment.



Figuur 23, Brandcompartmentering en WDBOBO-eisen laag 4 van het Maanhotel

[74][76] In het hotel moet ook gevlucht kunnen worden in geval van brand. De uitgang van een subbrandcompartiment kan bereikt worden vanuit ieder punt in een subbrandcompartiment binnen 30 meter. Vanaf de uitgang van een subbrandcompartiment op een verdieping zonder hotelkamers loopt een beschermde vluchtroute die binnen 30 meter de veiligheidsvluchtroute bereikt. Op de verdiepingen met hotelkamers loopt vanaf de uitgang van de beschermde subbrandcompartimenten en subbrandcompartimenten een extra beschermde vluchtroute waarmee binnen 20 meter de veiligheidsvluchtroute kan worden bereikt. Het trappenhuis is de veiligheidsvluchtroute in het hotel.

[76] Alle materialen die gebruikt worden in het hotel beschikken over een brand en/of rookklasse die vermeld staan in de bijlage. Verder is er noodverlichting en vluchtwegaanduiding nodig bij iedere vluchtroute en in het restaurant. Ook moet er in het hotel een brandmeldinstallatie zijn, een droge blusleiding en op iedere verdieping ten minste één brandslanghaspel.

De brandveiligheidseisen die we hebben opgesteld voor het hotel zijn van belang om te weten hoe het hotel precies is opgebouwd qua ruimtes en hoe de constructie hierin staat. Hierdoor kunnen we een realistische brandhaard bepalen bij elementen van de constructie die in onze ogen een kritiek punt vormen.

4. Uitgangspunten hoofdonderzoek

In dit hoofdstuk vind men de uitgangspunten voor het hoofdonderzoek. Als eerste is beschreven welke voorschriften van toepassing zijn. Daarna is het vereenvoudigde constructieve ontwerp van het Maanhotel beschreven. Als laatste is gekeken naar de eisen ten aanzien van de gevolgklasse van het Maanhotel. Dit hoofdstuk is in samenwerking met Timo Frielink gemaakt.

4.1. Van toepassing zijnde voorschriften

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. Dit hoofdstuk (4.1) is geschreven door Timo Frielink.

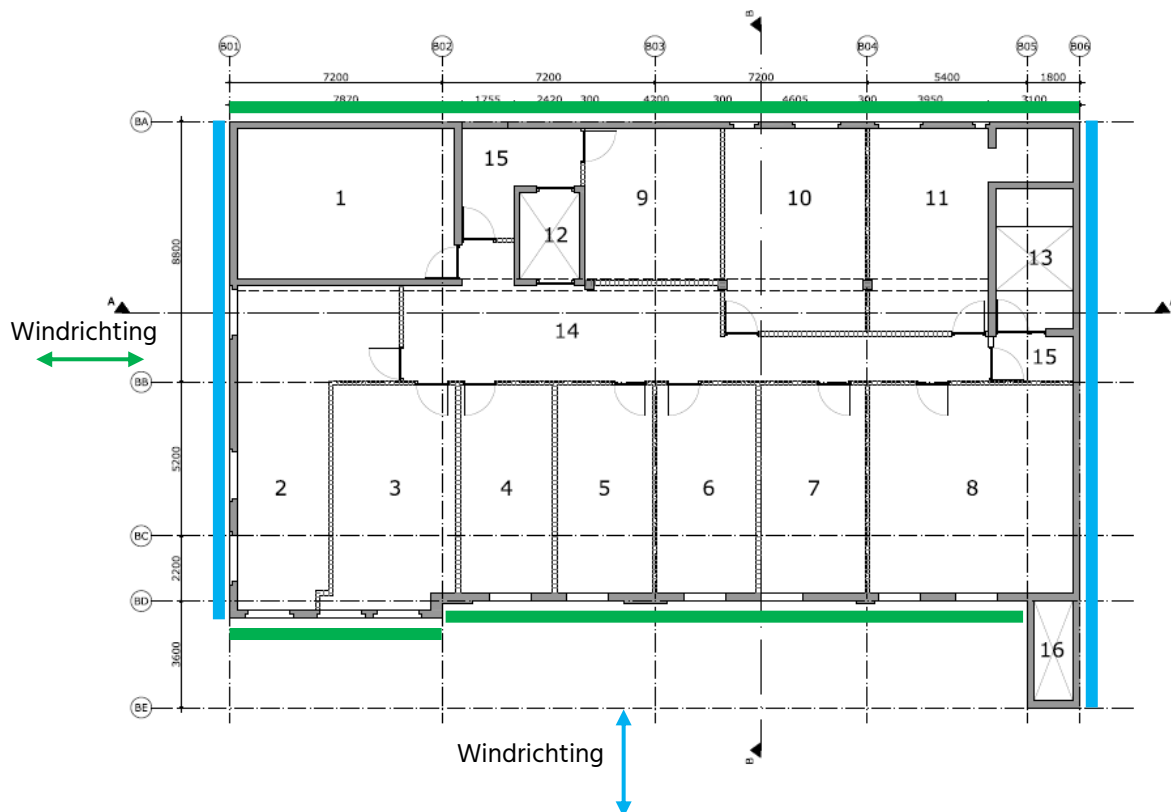
In dit hoofdstuk wordt alleen het ontwerp nader toegelicht. De berekeningen zijn in bijlage D te vinden en de plattegronden, doorsneden en details in bijlage E.

4.1.1. Algemene gegevens van de constructie

De hoofd draagconstructie 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 enigszins representatief voor Volantis. Ook worden constructies het meest 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 (zie figuur 24). Belangrijk zijn de gevelwanden. Deze wanden zijn in staat om de horizontale krachten veroorzaakt door wind op te nemen. Er zijn dus geen extra maatregelen te nemen tegen windbelasting door bijvoorbeeld een kern toe te voegen. Deze zit al standaard in het gebouw bij de galerij, daarom zal de kern ook meewerken aan de stabiliteit maar 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.

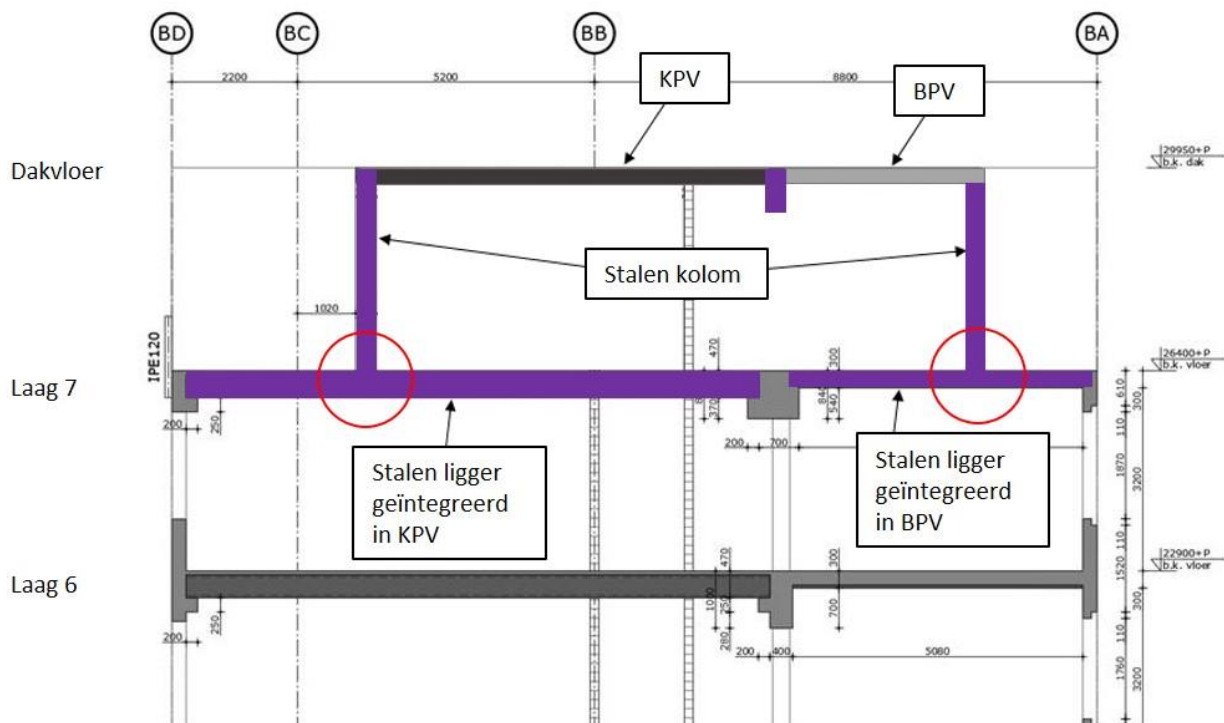


Figuur 24, windafdracht van gebouwdeel B, overgenomen van Timo Frielink, 2018

4.1.3. Dakconstructie

Als eerste wordt het dak uitgewerkt. Een constructeur werkt immers altijd van boven naar beneden. Het dak levert ook de nodige uitdagingen met zich mee in combinatie met laag 7. Het lastige aan het dak is dat deze in een bepaald gebied een stuk naar binnen staat ten opzichte van laag 7. Hierdoor kan er op laag 7 een dakterras gerealiseerd worden.

De vloer tussen as BD en de middenbalk wordt uitgevoerd als een kanaalplaatvloer. Deze kanaalplaatvloer is 400 millimeter hoog en wordt opgelegd op betonneuzen. De kanaalplaatvloer wordt gekoppeld zoals in figuur 25. Hierbij komt de vloer dus op de betonneus te liggen, maar er is wel een koppeling met de rest van de constructie. Tussen as BA en de middenbalk is voor een breedplaatvloer gekozen. Er is gekozen voor een verschil in vloeren. Dit heeft te maken met onder andere de lift. De afmetingen bij de lift zijn vrij klein om een kanaalplaat te leggen. Vanwege de uitvoering is daarmee 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 willen gaan roteren. Hiervoor is er een stijvere balk nodig om dit tegen te gaan. Wanneer er evenwicht is tussen de belastingen aan beide kanten zal de ligger niet gaan roteren en zijn er geen aanvullende maatregelen noodzakelijk.



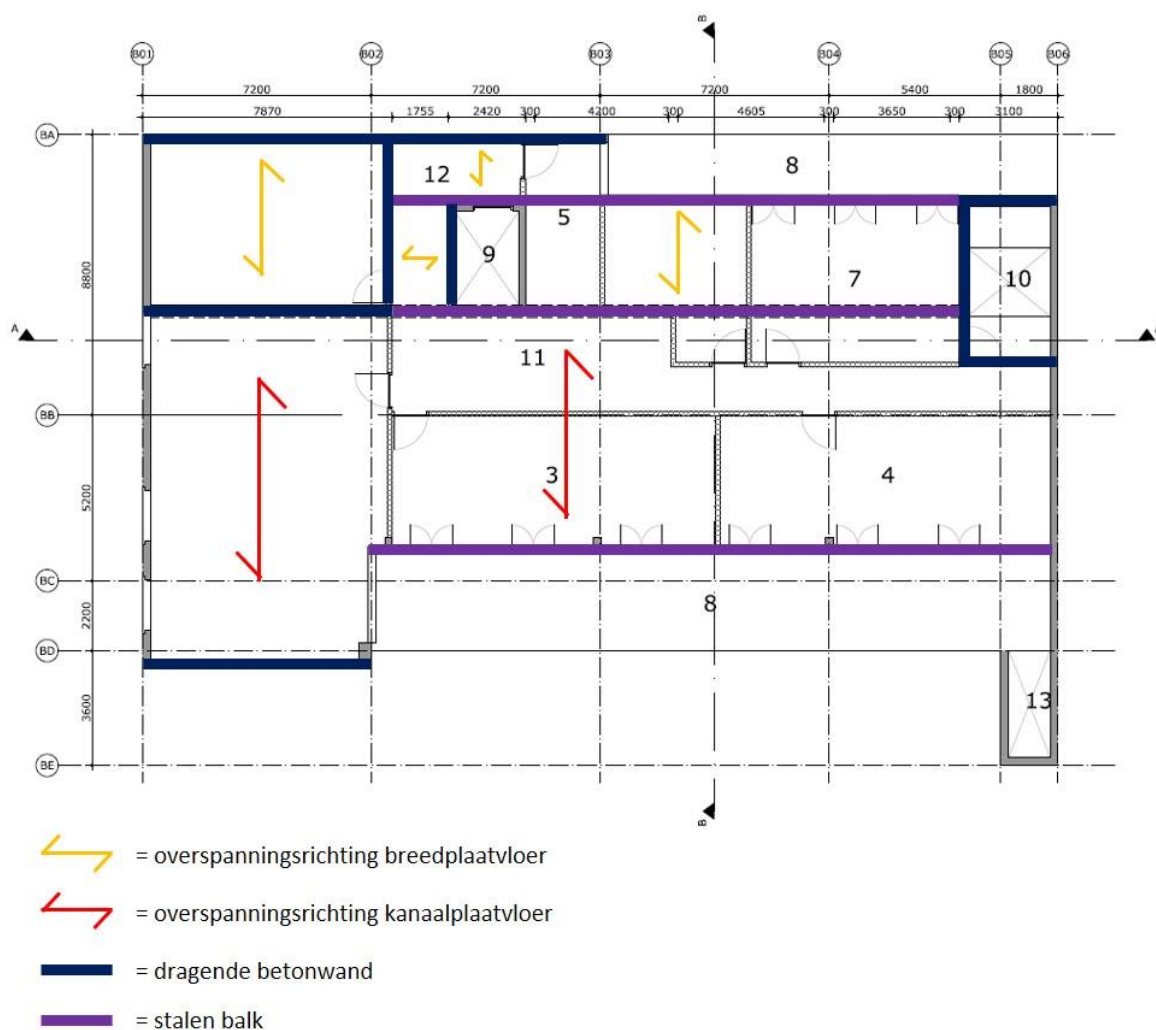
KPV = Kanaalplaatvloer

BPV = Breedplaatvloer

Figuur 25, doorsnede BB ter hoogte van laag 6 t/m de dakvloer, overgenomen van Timo Frielink, 2018

De structuur van het dak is te zien in figuur 26. 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 (zie figuur 26).

De skelet structuur tussen as B02 en B06 wordt in staal uitgevoerd. Het is zo dat de constructie vanwege het dakterras een paar meter terug ligt ten opzichte van de constructie van laag 7 (zie figuur 26). 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 26, 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 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, eenvoudigere en snellere oplossing.



Figuur 26, schematische weergave van de draagstructuur van het dak, overgenomen van Timo Frielink, 2018

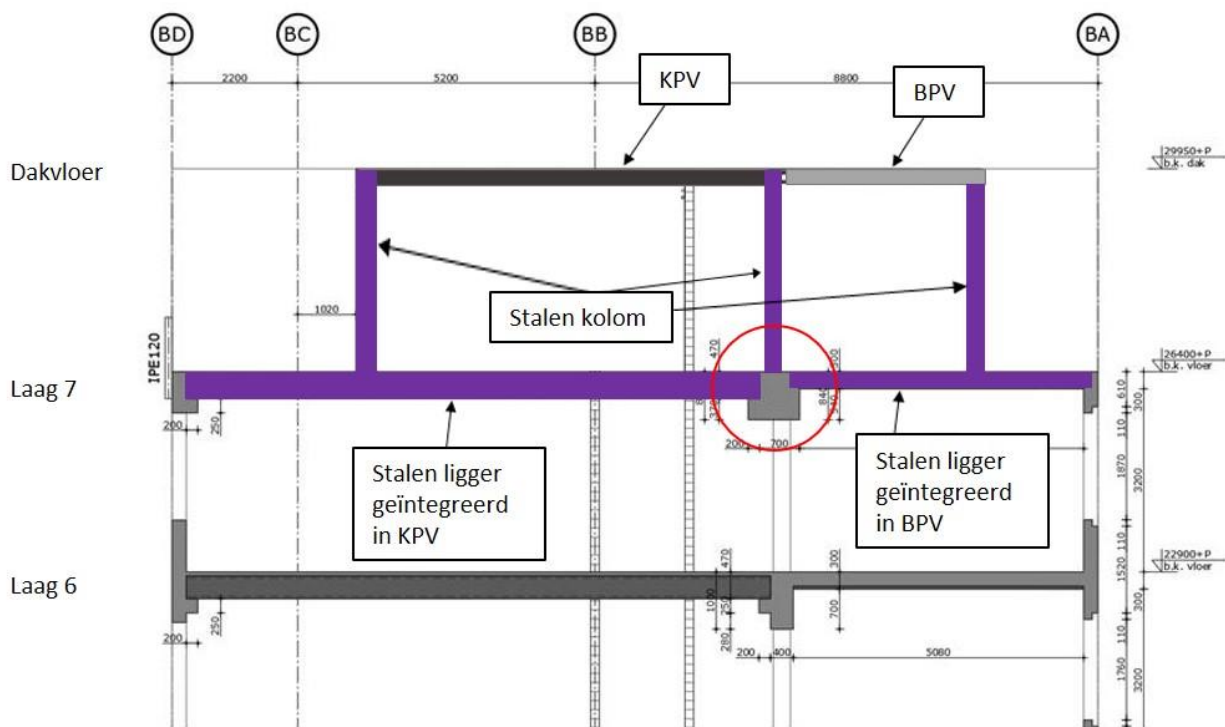
Voor de middenbalk in het dak zijn ook meerdere mogelijkheden. De uitdaging in deze aansluiting zit in het hoogteverschil van de vloeren en een verschil in vloertypen. Daarnaast is het van belang dat de ligger ook nog aangesloten kan worden aan een kolom. Het toepassen van een SFB-lijger is mogelijk. Een SFB-lijger 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-lijger. Een THQ-lijger is een kokerprofiel met twee uitstekende flenzen aan de onderkant. Deze dienen, net als de strip van de SFB-lijger, 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. Hierbij zou er een stuk staal uit de koker moeten worden gehaald, dan is er ruimte om bouten in de koker aan te brengen. Wanneer dat gedaan is, zal de koker weer dichtgelast worden. Met deze gedachte is besloten om de ligger als SFB-lijger 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 suites 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 balk ligt. Deze balk is wel van beton. Tussen de middenbalk en as BD ligt een kanaalplaatvloer van 400 millimeter hoog. De overspanning is in deze balk zodanig groot dat een breedplaatvloer deze overspanning nauwelijks te halen valt of dat is een dure oplossing. Tussen as BA en de middenbalk ligt een breedplaatvloer. De keuze voor een breedplaatvloer is dezelfde reden als bij het dak. Er is een minder groot verschil in krachten in de middenbalk en de uitvoering met betrekking tot de lift is met een breedplaatvloer beter te bewerkstelligen.

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 27 aangegeven met de rode cirkel.

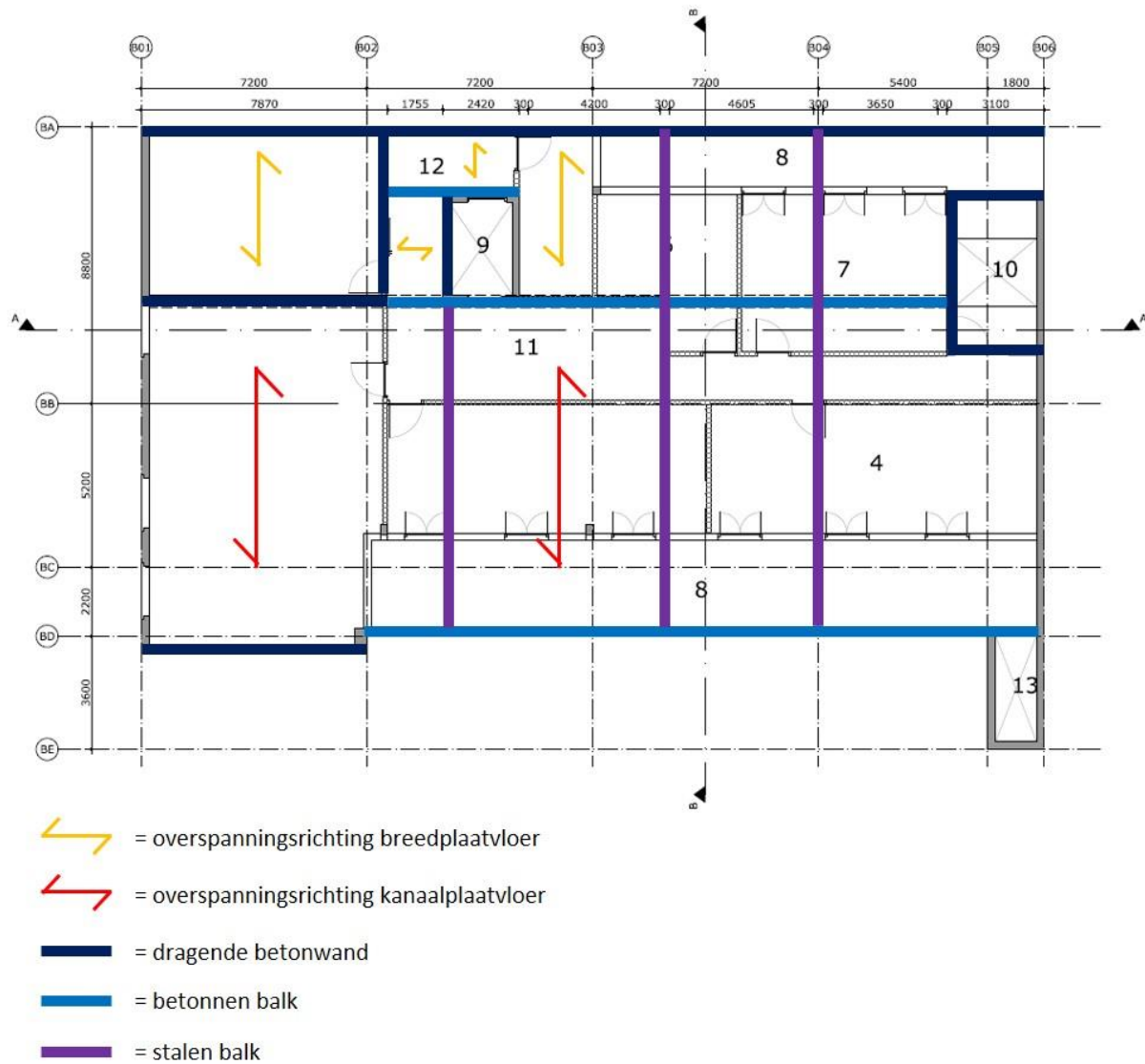


KPV = Kanaalplaatvloer

BPV = Breedplaatvloer

Figuur 27, doorsnede BB ter hoogte van laag 6 t/m het dak

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. Een detail hiervan is te vinden in figuur 12. Verder wordt de kanaalplaatvloer wederom op 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 28, schematische weergave van de draagstructuur van laag 7, overgenomen van Timo Frielink, 2018

4.1.5. Laag 1 t/m 6

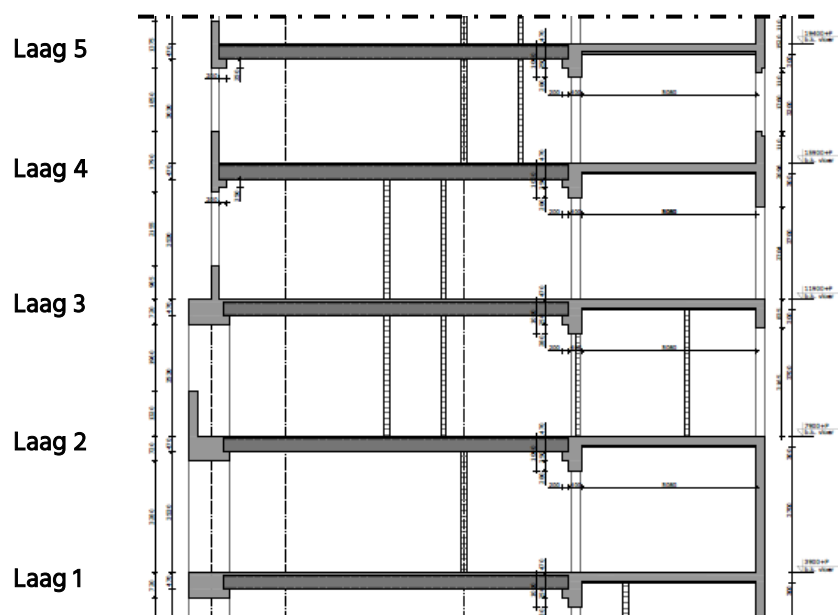
De overige lagen van het gebouwdeel B worden in 1 hoofdstuk besproken. De lagen 1 t/m 6 lijken op elkaar en de constructie verschilt maar heel weinig per verdieping. De opbouw wordt daardoor in dit hoofdstuk besproken en afwijkingen per bouwlaag worden gemeld.

De vloeren zijn hetzelfde als bij laag 7. Bij de overige lagen zit 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 dat niet elke verdieping hetzelfde is qua indeling. Zo zijn er op verdieping 3, 4, 5 en 6 hotelkamers te vinden terwijl op verdieping 2 een restaurant te vinden is. De variabele belasting op verdieping 2 is daarmee hoger dan op de verdiepingen met hotelkamers (ongeveer $5\text{kN/m}^2 - 1,75\text{kN/m}^2$). In bijlage D zijn alle berekeningen terug te vinden.

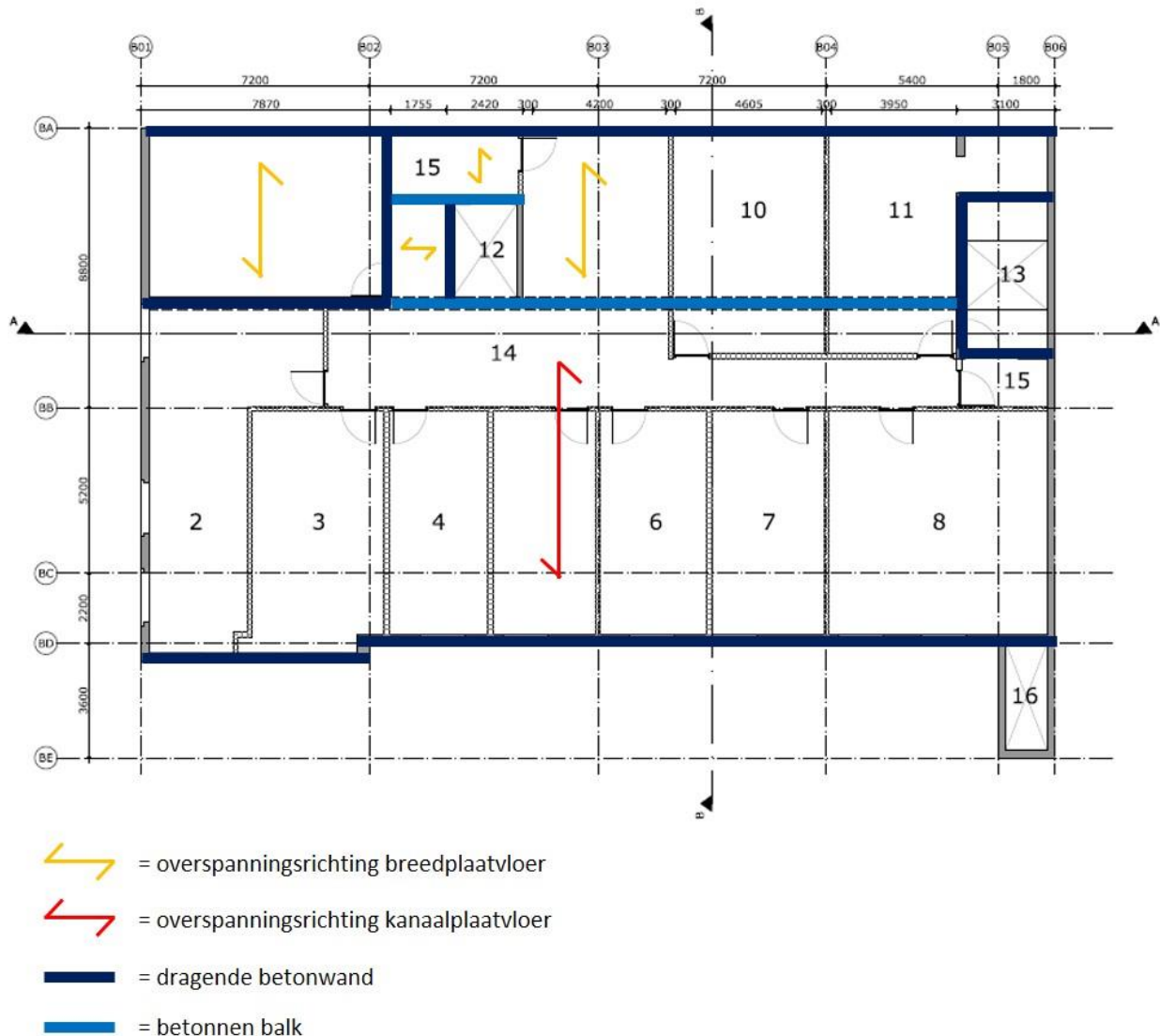
De kanaalplaatvloeren zijn net als op de zevende verdieping 400 millimeter hoog. De opleg is wederom op betonnen neuzen die aan de wand/balk worden vast gestort. De dimensies van de neuzen zijn terug te vinden in de detaillering. De breedplaatvloeren zijn 220 millimeter hoog. De vloer wordt in één keer gestort met de wand, wat betekent dat er een monolithische constructie ontstaat.

De wand in de voorgevel verspringt in laag 3 (zie figuur 29). Dat betekent dat de lagen 0, 1, 2 en 3 een dikkere gevelwand hebben dan de lagen 4, 5, 6 en 7. Dit is vanuit normaaldrukkracht geredeneerd een goede keuze. Onderin het gebouw is de normaaldrukkracht groter dan bovenin het gebouw. Hierdoor is meer beton een goede keuze omdat beton normaaldrukkracht kan opnemen. De gevelwanden bevatten op alle lagen flinke sparingen. Effect hiervan is dat de wanden, met name op de onderste verdiepingen, geschematiseerd kunnen worden als raamwerk met balken en kolommen.

Hiernaast is schematisch de draagstructuur van de lagen 1 t/m 6 te zien.



Figuur 29, doorsnede BB ter hoogte van laag 1 t/m 5, overgenomen van Timo Frielink, 2018



Figuur 30, schematische weergave van de draagstructuur van laag 1 t/m 6, overgenomen van Timo Frielink, 2018

4.1.6. Begane grond en fundering

De begane grond is in de casus de fundering. In het oorspronkelijke ontwerp zou er onder de begane grond nog twee kelderlagen aangelegd worden. De functie hiervan is 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 het project ingewikkelder. Vanwege dit feit is in overleg met Volantis de kelderlaag achterwege gelaten. Hierdoor is de begane grond ook de fundering. De vloer wordt een plaatvloer met een hoogte van 1000 millimeter. Ook de aansluitingen van de wanden en kolommen op de begane grond zijn monolithisch.

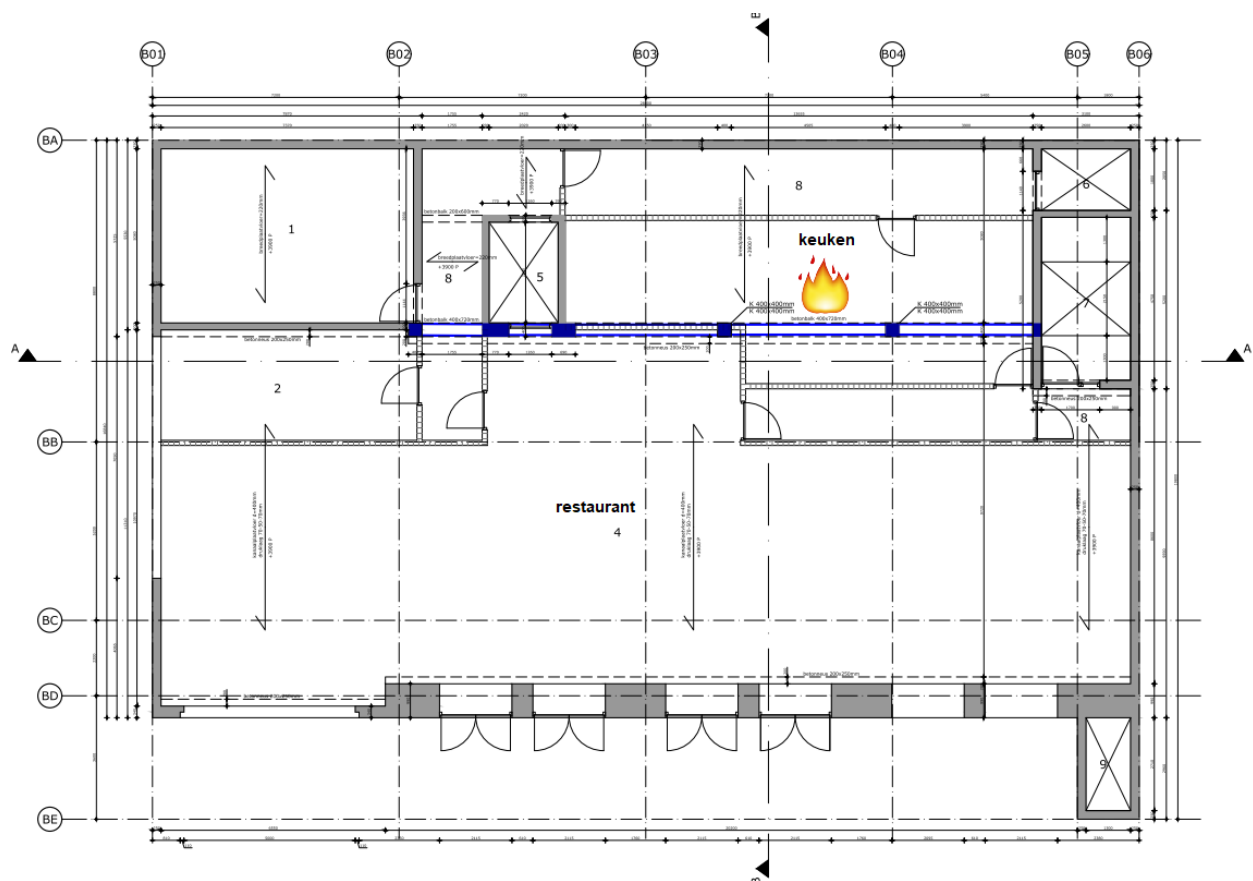
4.2. De brandhaard in het Maanhotel

Voor dit onderzoek is het handig om een brandhaard te creëren in het Maanhotel. Dit wordt gedaan om het onderzoek realistisch te maken. Door het creëren van een brandhaard wordt ook meteen bepaald waar met de constructie gerekend gaat worden.

Voor dit onderzoek is de brandhaard geplaatst in de keuken van het Maanhotel. Dit is een realistische plaats aangezien er in de keuken veel met vuur wordt gewerkt. Dit is een van de redenen waardoor er brand kan ontstaan. Verder staat in de keuken ook veel elektronische apparatuur. Hierdoor kan er kortsluiting ontstaan wat weer kan leiden tot brand.

De brandhaard is verder ter plaatse van de middenbalk geplaatst. Door de brandhaard op die plek te plaatsen kan met de middenbalk gerekend worden.

In bijlage E staat op de plattegrond van laag 1 de precieze plaats van de brandhaard aangegeven. Zie hieronder ook in figuur 31.



Figuur 31, Plattegrond laag 1 met brandhaard in de keuken en de met blauw aangegeven middenbalk en kolommen

4.3. Eisen ten aanzien van de gevolgklasse

Als uitgangspunt voor het ontwerp van een constructie moet gekeken worden in welke gevolgklasse een gebouw valt. Dit is van belang om een goed ontwerp te kunnen maken dat buitengewone omstandigheden kan opnemen. Voor het hotel van het Maankwartier kijken wij in welke gevolgklasse deze valt en wat de ontwerpstrategieën zijn voor die gevolgklasse. Aan de hand hiervan kunnen we kijken of de constructie die we al hebben voldoet in deze gevolgklasse bij buitengewone omstandigheden. Eerst is het belangrijk om te weten wat deze gevolklassen inhouden en wat de ontwerpstrategieën zijn per gevolklassen. Daarna wordt de gevolgklasse bepaald voor het hotel met de bijbehorende ontwerpstrategie.

4.3.1. Betekenis en definitie volgens NEN-EN 1990 en NEN-EN 1991-1-7

[65][68] Betekenis gevolgklasse: classificatie van de gevolgen van bezwijken van de constructie of een gedeelte ervan.

CC is een afkorting voor Consequences Classes (gevolgklassen).

Definitie van gevolklassen, zie tabel 2.

Tabel B1 — Definitie van gevolklassen

Gevolgklasse CC	Omschrijving	Voorbeelden van gebouwen en civieltechnische werken
CC3	Grote gevolgen ten aanzien van het verlies van mensenlevens, of zeer grote economische gevolgen, sociale gevolgen of gevolgen voor de omgeving.	Tribunes, openbare gebouwen waarbij de gevolgen van het bezwijken groot zijn (bijv. een concertzaal)
CC2	Middelmatige gevolgen ten aanzien van het verlies van mensenlevens, aanzienlijke economische gevolgen, sociale gevolgen of gevolgen voor de omgeving.	Woon- en kantoorgebouwen, openbare gebouwen waar de gevolgen van bezwijken beperkt zijn (bijv. een kantoorgebouw)
CC1	Geringe gevolgen ten aanzien van het verlies van mensenlevens, of kleine of verwaarloosbare economische gevolgen, sociale gevolgen of gevolgen voor de omgeving.	Gebouwen voor de landbouw waar mensen normaal niet verblijven (bijv. opslagschuren, tuinbouwkassen)

Tabel 2, tabel B1 - definitie van gevolklassen, overgenomen uit 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. Geraadpleegd op 20 april 2018, van <https://connect.nen.nl/Standard/Detail/207228?compid=11921&collectionId=0>

Buitengewone ontwerpsituaties voor de verschillende gevolklassen volgens tabel 2 mogen volgens NEN-EN 1991-1-7 op de volgende manier worden beschouwd.

- CC1: een specifieke beschouwing voor buitengewone situaties is niet perse nodig, behalve om te garanderen dat is voldaan aan de regels die van toepassing zijn voor robuustheid en stabiliteit zoals vermeld in EN 1990 t/m EN 1999.
- CC2: afhankelijk van de specifieke omstandigheden van de constructie, mag een vereenvoudigde berekening met modellen met equivalente belastingen zijn gebruikt of mogen voorgeschreven ontwerp/detaileringsregels zijn toegepast.

- CC3: een onderzoek naar het specifieke geval behoort te zijn uitgevoerd om het vereiste betrouwbaarheidsniveau en de diepgang van de constructieve berekeningen te bepalen. Hierdoor kan het noodzakelijk zijn dat een risicoanalyse wordt uitgevoerd en dat gebruik wordt gemaakt van verfijnde methoden zoals dynamische berekening, niet-lineaire modellen en wisselwerking tussen de belasting en de constructie.

In **tabel 3** is een indeling gemaakt van soorten gebouwen en het gebruiksdoel naar gevolgklasse.

Tabel A.1 — Indeling van gevolgklassen

Gevolgklasse	Voorbeeld van indeling van soorten gebouwen en het gebruiksdoel
1	Woonhuizen van maximaal 4 bouwlagen. Gebouwen met agrarische bestemming. Gebouwen waarin zich niet veel personen ophouden, mits geen enkel deel van het gebouw zich dichterbij een afstand van 1 ½ maal de gebouwhoogte bij een ander gebouw, of een gebied waar zich wel personen ophouden, bevindt.
2a Risicogroep laag	Woonhuizen van 5 bouwlagen. Hotels van maximaal 4 bouwlagen. Flats, appartementen en andere woongebouwen van maximaal 4 bouwlagen. Kantoren van maximaal 4 bouwlagen. Industriële gebouwen van maximaal 3 bouwlagen. Winkels van maximaal 3 bouwlagen met een vloeroppervlakte kleiner dan 1 000 m ² per bouwlaag. Onderwijsgebouwen van één bouwlaag. Alle openbare gebouwen van maximaal twee bouwlagen en met vloeroppervlakten van niet meer dan 2 000 m ² per bouwlaag.
Gevolgklasse	Voorbeeld van indeling van soorten gebouwen en het gebruiksdoel
2b Risicogroep hoog	Hotels, flats, appartementen en andere woongebouwen van meer dan 4 bouwlagen, maar van maximaal 15 bouwlagen. Onderwijsgebouwen van meer dan één bouwlaag, maar van maximaal 15 bouwlagen. Winkels van meer dan 3 bouwlagen, maar van maximaal 15 bouwlagen. Ziekenhuizen van maximaal 3 bouwlagen. Kantoren van meer dan 4 bouwlagen, maar van maximaal 15 bouwlagen. Alle openbare gebouwen met vloeroppervlakten van meer dan 2 000 m ² , maar van niet meer dan 5 000 m ² per bouwlaag. Parkeergarages van maximaal 6 bouwlagen.
3	Alle gebouwen hierboven vermeld als gevolgklasse 2 laag en hoog, die buiten de grenzen van oppervlakte of aantal bouwlagen vallen. Alle gebouwen waarin publiek in grote aantallen is toegelaten. Stadions voor meer dan 5 000 toeschouwers Gebouwen met gevaarlijke stoffen en/of processen

Tabel 3, tabel A.1 - indeling van gevolgklassen, overgenomen uit normcommissie 351 001 "Technische Grondslagen voor Bouwconstructies". (2011, 1 december). NEN-EN 1990+A1+A1/C2: Eurocode: Grondslagen van het constructief ontwerp. Geraadpleegd op 20 april 2018, van <https://connect.nen.nl/Standard/Detail/162984?compId=11921&collectionId=0>

Bij deze tabel staan opmerkingen. De eerste opmerking zegt dat gebouwen met meer dan één gebruiksdoel tot de strengste gevolgklasse behoren. De tweede opmerking zegt dat bij het bepalen van het aantal bouwlagen de kelderverdiepingen buiten beschouwing mogen worden gelaten, mits deze voldoen aan de eisen van gevolgklasse 2b.

4.3.2. Aanbevolen strategieën volgens NEN-EN 1991-1-7

[68] Wanneer de aanbevolen strategieën gebruikt worden zou dat een gebouw opleveren met een aanvaardbaar niveau van robuustheid om lokaal bezwijken te doorstaan zonder een disproportioneel niveau van instorting.

- CC1: een gebouw moet ontworpen, berekend en gebouwd zijn, volgens de regels uit NEN-EN 1990 t/m NEN-EN 1999, voor voldoende stabiliteit bij normaal gebruik. Wanneer dat zo is dan is geen verdere specifieke beschouwing nodig voor buitengewone belastingen door onbekende oorzaken.
- CC2a: Als aanvulling op de strategieën van CC1, moeten effectieve horizontale trekbanden of effectieve verankering van vloeren aan wanden zijn toegepast in een gebouw. Dit is vastgelegd in bijlage A.5.1. en A.5.2. voor constructies met respectievelijk kolommen en dragende wanden.
- CC2b: Als aanvulling op de strategieën van CC1, moeten effectieve horizontale trekbanden zijn toegepast, zoals is vastgelegd in bijlage A.5.1. en A.5.2. voor constructies met respectievelijk kolommen en dragende wanden, in combinatie met verticale trekbanden, zoals is gedefinieerd in bijlage A.6, in alle dragende kolommen en wanden.

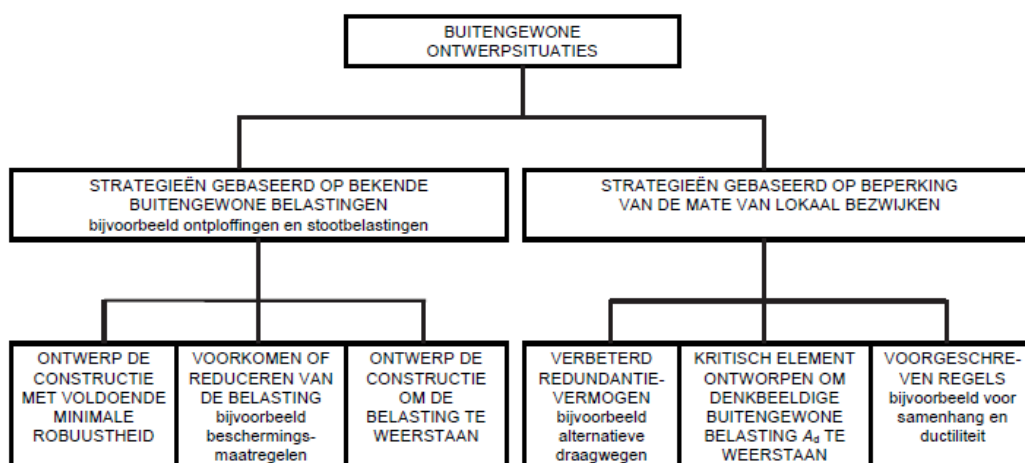
Of men kan als alternatief gebruik maken van de volgende strategie:

Een gebouw dient te zijn gecontroleerd of bij het denkbeeldig verwijderen van iedere dragende kolom en iedere ligger die een kolom ondersteunt of een willekeurig deel van een dragende wand, zoals is gedefinieerd in bijlage A.7, de stabiliteit van het gebouw verzekerd is en of lokale schade een bepaalde grens niet overschrijdt.

Wanneer het denkbeeldig verwijderen van een dergelijke element zou resulteren in schade die groter is dan de afgesproken grens of voorgeschreven grens moet een dergelijk element zijn ontworpen als 'kritisch element'. De grens van toelaatbaar bezwijken kan per gebouw verschillend zijn, maar de aanbevolen waarde is de kleinste waarde van 15% van het vloeroppervlak of 100m² op iedere bouwlaag.

- CC3: er moet een systematische risicoanalyse zijn uitgevoerd van het gebouw, waarbij rekening is gehouden met voorzien en onvoorzien gevaarlijke omstandigheden. In bijlage B van NEN-EN 1991-1-7 staat een richtlijn voor zo'n risicoanalyse.

4.3.3. Strategieën voor buitengewone ontwerpsituaties volgens NEN-EN 1991-1-7



Figuur 3.1 — Strategieën voor buitengewone ontwerpsituaties

Figuur 32, Strategieën voor buitengewone ontwerpsituaties, overgenomen uit 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. Geraadpleegd op 20 april 2018, van <https://connect.nen.nl/Standard/Detail/207228?compId=11921&collectionId=0>

[68] De strategieën uit figuur 32 kunnen worden toegepast bij de gevolgklassen wanneer dat bij de gevolgklasse van toepassing is.

4.3.4. Toepassing gevolgklasse op het hotel van het Maankwartier

[65][68] Het hotel van het Maankwartier valt onder gevolgklasse CC2. In deze klasse valt het hotel onder de risicogroep hoog aangezien het hotel meer dan 4 bouwlagen heeft. De gevolgklasse van het hotel is dus CC2b. Om het gebouw veilig te maken tegen eventuele buitengewone omstandigheden zijn er een paar strategieën die je moet volgen.

- De aanbevolen strategieën van CC1 moeten zijn toegepast. Dit houdt in dat het gebouw volgens de regels uit NEN-EN 1990 t/m NEN-EN 1999 moet zijn ontworpen, berekend en gebouwd voor voldoende stabiliteit bij normaal gebruik.
- Verder kan men kiezen uit de volgende twee strategieën die ook toegepast dienen te worden:
 - Er moeten effectieve horizontale trekbanden worden toegepast voor in combinatie met verticale trekbanden in alle dragende kolommen en waden zoals is vastgelegd in bijlage A.5.1, A.5.2. en A.6.
 - Een gebouw moet gecontroleerd worden of het bij het denkbeeldig verwijderen van iedere dragende kolom of willekeurig deel van een dragende wand en iedere ligger die een kolom ondersteunt de stabiliteit van een gebouw verzekerd is en of lokale schade een bepaalde grens niet overschrijdt. De aanbevolen grens voor lokale schade is de kleinste waarde van of 15% van het vloeroppervlak of 100m² op iedere bouwlaag. Wanneer bij het denkbeeldig verwijderen van een dergelijk element de resulterende schade groter is dan de aanbevolen of afgesproken grens, dan moet het dergelijk element als 'kritisch element' zijn ontworpen.

Bij het hotel van het maankwartier worden de strategieën van gevolgklasse CC2b toegepast, waarbij is gekozen om de strategie met het denkbeeldig verwijderen van dragende elementen toe te passen in plaats van het toepassen van trekbanden. Voor de grens van de maximale lokale schade wordt de aanbevolen grens aangehouden. Wanneer het toepassen van deze strategie geen functioneel ontwerp oplevert kan altijd nog de strategie met de trekbanden worden toegepast.

Deze strategie wordt in dit onderzoek niet onderzocht. In dit onderzoek wordt eerst onderzocht of de constructie voldoende ductiliteit heeft. Aan de hand van de plastische vervorming in de constructie zal gekeken worden of de constructie de krachten in een buitengewone situatie aankan. Wanneer dit is onderzocht kan de strategie met het denkbeeldig verwijderen van dragende elementen worden onderzocht in een verder onderzoek.

5. Hoofdonderzoek

In dit hoofdstuk zullen de uitkomsten van het hoofdonderzoek besproken worden. Het hoofdonderzoek richt zich vooral op de plastische vervorming bij beton in een normale situatie en in een brand situatie.

In paragraaf 5.1 wordt er gekeken naar hoe plastische vervorming beschreven staat in de Eurocode. Wat kunnen we leren uit de Eurocode, aan welke eisen moet een plastische berekening voldoen, en hoe moeten we een plastische berekening uitvoeren.

In paragraaf 5.2 is er onderzocht welk internationaal onderzoek er al naar plastische vervorming is gedaan en wat de ontwikkelingen op dat gebied zijn in de wereld. Verder wordt er dan ook gekeken of er een relatie is te vinden tot dit onderzoek naar plastische vervorming bij brand.

Dan wordt er in paragraaf 5.3 naar de plastische vervorming in Hotel Maankwartier gekeken. Hierbij wordt gekeken naar de plastische vervorming van de doorsnede van de middenbalk, de plastische vervorming van een ligger, de plastische vervorming van een raamwerk en de plastische vervorming van de kolommen.

Vervolgens zal er in paragraaf 5.4 worden gekeken naar de plastische vervorming in combinatie met brand.

Waarom het nuttig is om in een brand situatie naar de plastische vervorming te kijken.

5.1. Plastische vervorming in de Eurocode

[90] In dit hoofdstuk zal worden gekeken naar hoe plastische vervorming staat beschreven in de Eurocode. Er wordt gekeken naar de NEN-EN 1992 voor beton omdat we in dit onderzoek specifiek naar de plastische vervorming van beton kijken. Het is van belang om eerst in de Eurocode te kijken om te kunnen begrijpen hoe we naar plastische vervorming kunnen kijken bij Hotel Maankwartier.

NEN-EN 1992-1-1 voor beton bevat een hoofdstuk (5.6) over de plastische berekening. In dit hoofdstuk zijn drie paragrafen: 5.6.1 Algemeen, 5.6.2 Plastische berekening van balken, raamwerken en platen, en 5.6.3 Rotatiecapaciteit. Hieronder zal worden beschreven wat men in die paragrafen kan vinden.

In paragraaf 5.6.1 worden de algemene bepalingen beschreven voor de plastische berekening. Er wordt beschreven dat de methodes die toegepast kunnen worden voor een plastische berekening alleen in de UGT mogen worden toegepast. Verder moet de Ductiliteit van kritieke doorsnedes voldoende zijn. Ook wordt er beschreven welke methode kan worden toegepast voor een plastische berekening. Dit kan een berekening zijn op basis van de statistische methode (ondergrens) of op basis van de kinematische methode (bovengrens). Voor beide methodes staan er voorwaarden waaraan voldaan moet worden in de paragraaf. Als laatste staat er dat de effecten van eerder opgetreden belastingen mag worden verwaarloosd en er mag zijn aangenomen dat de intensiteit van de belasting geleidelijk toeneemt.

In paragraaf 5.6.2 wordt beschreven aan welke voorwaarden moet worden voldaan om een plastische berekening te maken voor balken, platen en raamwerken. De voorwaarden hebben betrekking op de ductiliteit, de kolommen die een plastische moment krijgen door aansluitende elementen en platen waarbij een plastische berekening wordt gemaakt.

In paragraaf 5.6.3 wordt beschreven hoe door middel van de rotatiecapaciteit van een ligger of plaatzones een vereenvoudigde procedure kan worden toegepast. Deze procedure toetst de rotatie die ontstaat door de van toepassing zijnde belastingcombinaties aan de toelaatbare plastische rotatie. De zones die een plastische rotatie hebben worden plastische scharnieren genoemd. Verder staan in deze paragraaf voorwaarden hoe de plastische rotatie bepaald dient te worden.

In de Eurocode is voor beton maar een klein hoofdstuk gewijd aan de plastische vervorming. Hierin staan kort de voorwaarden waar je aan moet voldoen voor een plastische berekening via verschillende methodes. Verder staat er geen uitleg hoe je een plastische berekening maakt en wanneer je een plastische berekening zou moeten maken. In andere normen van de Eurocode wordt plastische vervorming ook maar weinig genoemd en wordt vaak doorverwezen naar de bijbehorende hoofdstukken van de plastische berekening voor het bepaalde soort materiaal waarmee je wilt rekenen. Om meer te weten te komen over hoe een plastische berekening gemaakt moet worden zal dus een studieboek met inhoud over plasticiteit gebruikt moeten worden.

5.2. Internationaal onderzoek naar plastische vervorming

Om te begrijpen hoe er naar plasticiteit bij beton gekeken wordt en wat de ontwikkelingen zijn op dat gebied in de wereld is er een kleine literatuurstudie gedaan naar verschillende onderzoeken over plasticiteit. Ook zal er gekeken worden of er ook onderzoeken zijn naar plasticiteit bij beton in combinatie met brand.

In dit hoofdstuk wordt gekeken naar verschillende internationale onderzoeken over plastische vervorming. Er zullen vier onderzoeken beschouwd worden omdat er op het onderwerp plastische vervorming redelijk wat onderzoek is gedaan en het te veel tijd kost om alles door te lezen. Van de onderzoeken wordt kort toegelicht waar onderzoek naar gedaan is en worden kort de conclusies uit het onderzoek beschreven. Daarna is er een algemene conclusie over het nut van deze onderzoeken met betrekking tot dit onderzoek naar plastische vervorming.

5.2.1. Damage-plastic model for concrete failure

[87] Het eerste onderzoek wat is bekeken is het onderzoek van Peter Grassl en Milan Jirásek: 'Damage-plastic model for concrete failure' uit 2006. In dit onderzoek is onderzocht hoe de combinatie tussen plasticiteit en schade kan worden toegepast bij het modeleren van het falen van beton. Het plastische deel is gebaseerd op de effectieve spanning en het schade model is gedreven door de plastische rek. Het model wat ontstaat uit de combinatie plasticiteit en schade is onderzocht op de resultaten die eruit komen en die resultaten zijn weer vergeleken met een breed scala aan experimentele resultaten. Als laatste is het plasticiteits-schade model toegepast op de constructieve analyse van gewapende betonnen kolommen.

De volgende conclusies komen uit dit onderzoek naar voren:

- Voor plasticiteits-schade modellen met het plastische deel op basis van de effectieve spanning, is lokale uniekheid altijd gegarandeerd (op voorwaarde dat dit alleen voor het plastische deel is gegarandeerd). Dit is niet altijd het geval voor modellen met het plastische deel op basis van de nominale spanning.
- De combinatie van plasticiteit op basis van de effectieve spanning en isotrope schade die door de plastische rek wordt gedreven, is geschikt gebleken voor het voorspellen van het falen van beton in een breed scala van belastinggevallen, van een-assige spanning tot drie-assige samendrukking.
- Het plasticiteits-schade model kan de vermindering van de afschuifstijfheid ten gevolge van eerdere drukbelasting gedeeltelijk vastleggen.
- Het model is thermodynamisch consistent en de algoritmische stijfheidsmatrix is beschikbaar.
- Het model is geschikt voor driedimensionale constructieve toepassingen en lijkt redelijk goed te voorspellen wat de reactie is van gewapend betonnen kolommen onder excentrische samendrukking.

Dit onderzoek is veel gebruikt als referentie onderzoek voor veel onderzoeken over het plastische-schade model in de laatste 10 jaar. Het model kan zeer goed gebruikt worden om de robuustheid van betonnen constructies te verbeteren, aangezien plasticiteit bij de robuustheid van constructies een grote rol speelt.

5.2.2. Computational applications of a coupled plasticity-damage constitutive model for simulating plain concrete fracture

[88] Het tweede onderzoek wat is bekeken is het onderzoek van Rashid K. Abu Al-Rub en Sun-Myung Kim: 'Computational applications of a coupled plasticity-damage constitutive model for simulating plain concrete fracture' uit 2010. In dit onderzoek is onderzocht of de computationele toepassingen van een gecombineerd plasticiteits-schade model het gedrag van gewoon beton kunnen simuleren. Door dit onderzoek kan het gedrag van beton in een constructie beter begrepen worden.

Uit dit onderzoek is gekomen dat het voorgestelde model met een combinatie van plasticiteit en schade een effectieve methode is voor het modelleren van het gedrag van beton onder verschillende belastingsomstandigheden en het model geschikt is voor driedimensionale constructieve betonnen toepassingen.

Door dit onderzoek is er weer meer kennis beschikbaar om het gedrag van betonnen constructies beter te begrijpen en voorspellen met behulp van computerprogramma's. Het onderzoek is onder andere gebaseerd op het onderzoek uit paragraaf 1.

5.2.3. Behaviour of Plain Concrete Beam subjected to Three Point Bending using Concrete Damaged Plasticity (CDP) Model

[89] Het derde onderzoek dat is bekeken is het onderzoek van Jobin George, Kalyana Rama J. S., Siva Kumar M. V. N. en Vasan A. : 'Behaviour of Plain Concrete Beam subjected to Three Point Bending using Concrete Damaged Plasticity (CDP) Model' uit 2016. Zoals de titel van het onderzoek aangeeft is het gedrag van een betonnen balk, die is onderworpen aan een driepuntsbuiging, onderzocht. In dit onderzoek is een computer gebaseerde simulatie met de eindige-elementen-methode uitgevoerd om het non-lineaire gedrag van het beton uit het plasticiteits-schade model te bestuderen.

In dit onderzoek is er gekeken of het plasticiteits-schade model het gedrag van een gewone betonnen balk kan voorspellen. Van de betonnen balk waren meerdere varianten genomen verschillend in betonsamenstelling en dimensies om erachter te komen of de voorspellingen uit het model klopten.

Uit dit onderzoek kwam dat het plasticiteits-schade model afhankelijk bleek te zijn van de grootte van het granulaat wat gebruikt werd in het beton.

Ook dit onderzoek is belangrijk voor het beter begrijpen van het (plastische) gedrag van beton. Ook al lijkt het een simpel onderzoek met een betonnen balk. Het is duidelijk geworden dat voor het beter begrijpen van het gedrag van beton ook gekeken moet worden naar de verschillende samenstellingen van beton en de invloed dat dat kan hebben op het gedrag en de plasticiteit.

5.2.4. A plastic-damage model for concrete in fire: Applications in structural fire engineering

[86] Het vierde onderzoek dat is bekeken is het onderzoek 'A plastic-damage model for concrete in fire: Applications in structural fire engineering' van Thomas Gernay en Jean-Marc Franssen uit 2014. Dit onderzoek is gedaan om een nieuw multiaxiaal model te ontwikkelen voor beton in een brand situatie. Voor beton in een brand situatie zijn er heel weinig modellen die betrouwbaarheid en robuustheid combineren. Er is ook nauwelijks iets bekend in de literatuur over het plasticiteits-schade model voor beton bij hoge temperaturen.

Het nieuw ontwikkelde model is gebaseerd op het plasticiteits-schade model uit paragraaf 1. Het ontwikkelde model kan gebruikt worden voor praktische toepassingen in structural fire engineering. Het model laat het scheurpatroon van gewoon beton goed zien onder schuif- en trekkracht bij hoge temperaturen.

Door dit onderzoek is er dus meer kennis verkregen hoe beton zich gedraagt bij hoge temperaturen zoals bij brand. Door het gebruik van het plasticiteits-schade model zijn de invloeden van plasticiteit bij brand

meegenomen om zo de schade te bepalen. Het ontwikkelde model uit dit onderzoek helpt zeker om de robuustheid van betonnen constructies te verbeteren bij brand.

5.2.5. Conclusie uit de literatuurstudie

Na deze literatuur studie gedaan te hebben is meer duidelijk geworden hoe er in de wereld naar plasticiteit wordt gekeken en wat de ontwikkelingen zijn op dat gebied. Wat als eerste opvalt bij het zoeken naar artikelen over plasticiteit is dat er niet zo heel veel artikelen over zijn in tegenstelling met andere onderwerpen van beton. Verder komen de meeste artikelen pas uit de laatste 20 jaar. De reden hiervoor kan zijn dat de artikelen die daarvoor zijn geschreven nog niet gedigitaliseerd zijn en dus niet zo makkelijk te vinden zijn. Maar het kan ook zijn dat het belang van dit onderwerp en de mogelijkheid om het te onderzoeken pas recent (afgelopen 20 jaar) duidelijk is geworden.

De meeste onderzoeken naar plasticiteit gaan over het plasticiteits-schade model (plastic-damage model) en de verschillende toepassingen daarvan. Het is duidelijk geworden dat het plasticiteits-schade model een handige tool is om de schade en het gedrag van beton te kunnen voorspellen. In de loop der jaren is dat model dan ook weer verbeterd en zijn er meerdere toepassingen voor onderzocht.

Een van de toepassingen is om het model te gebruiken bij het ontwikkelen van een model speciaal om het gedrag te voorspellen van betonnen constructies bij brand. Hierdoor kan vrij precies de schade van beton bij een bepaalde temperatuur bepaald worden. Dit is natuurlijk een zeer interessant onderzoek wat aansluit bij dit onderzoek naar plasticiteit van de betonconstructie van het Maanhotel bij brand.

Al deze onderzoeken zijn natuurlijk erg belangrijk om meer over de plasticiteit en het gedrag van beton te kunnen begrijpen. Echter is het niet duidelijk of deze onderzoeken en de modellen die eruit voortkomen ook daadwerkelijk gebruikt worden bij het ontwerpen van een constructie of in rekenprogramma's voor constructies. Het zou namelijk veel kunnen opleveren voor de robuustheid van een ontworpen constructie als de ontwikkelde modellen in de rekenprogramma's voor constructies zitten.

5.3. Plastische vervorming in het Maanhotel

In dit hoofdstuk is onderzoek gedaan naar de plastische vervorming van beton in het Maanhotel. Als eerste wordt gekeken naar de uitgangspunten die gelden voor de plastische berekeningen. Daarna zal de plastische vervorming van de doorsnede van de middenbalk worden beschouwd. Vervolgens wordt gekeken naar de plastische vervorming van een ligger. Als laatste wordt gekeken naar de plastische vervorming van een raamwerk in het Maanhotel.

In dit onderzoek naar de tweede draagweg bij het Maanhotel zal een bezwijkanalyse worden uitgevoerd op een liggerdeel en een raamwerk. De reden dat in dit onderzoek bij het Maanhotel een bezwijkanalyse uitgevoerd wordt op een liggerdeel en een raamwerk is om zo te kunnen voorspellen hoe een bepaald deel van de constructie zal gaan bezwijken. Hierdoor kunnen we bepalen of de constructie sterk genoeg is in een brand situatie of dat er toch een tweede draagweg nodig is in het Maanhotel.

5.3.1. Plastische vervorming van beton

[91] In deze paragraaf wordt kort een uitleg gegeven wat er bij plastische vervorming van beton gebeurt en hoe men de plastische vervorming kan berekenen.

Beton vervormt zich plastisch wanneer het overbelast wordt. Als een bijvoorbeeld een betonnen ligger overbelast wordt zal deze vervormen en gaan buigen. Wanneer de belasting eraf gehaald wordt zal de ligger niet meer in de oorspronkelijke staat terug keren. De ligger is dus plastisch vervormt. Wanneer de ligger wel in zijn oorspronkelijke staat kan terug keren na belastingen is de ligger elastisch vervormt.

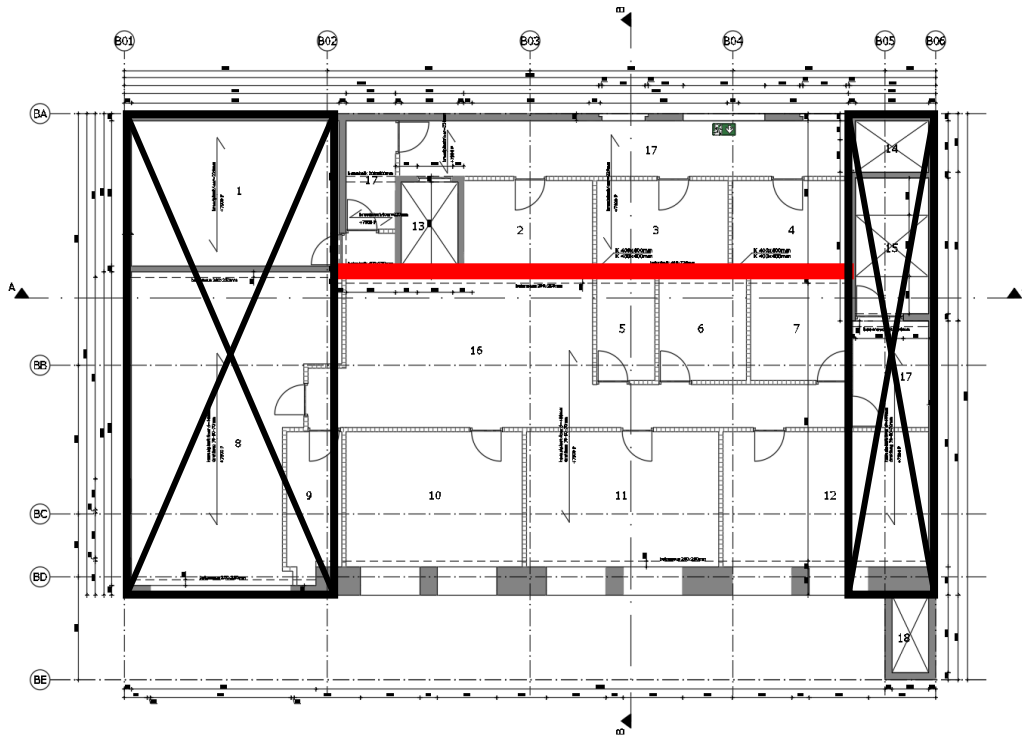
Bij een plastische vervorming ontstaan ook plastische momenten. Deze momenten ontstaan op de plaatsten waar de ligger het zwaarst belast wordt. Als er een zodanige belasting op de ligger staat zal op de plaats van het plastische moment een plastisch scharnier ontstaan. Wanneer er voor de ligger voldoende scharnieren zijn zal deze bezwijken.

Men kan het plastische moment berekenen aan de hand van de doorsnede van de betonnen ligger. Met behulp van het plastische moment kan dan weer de bezwijkbelasting worden bepaald. De bezwijkbelasting of bezwijklast is de maximale belasting die de ligger kan dragen voordat deze bezwijkt. Er treedt dan zodanige schade en vervorming op dat de ligger niet meer constructief bruikbaar is.

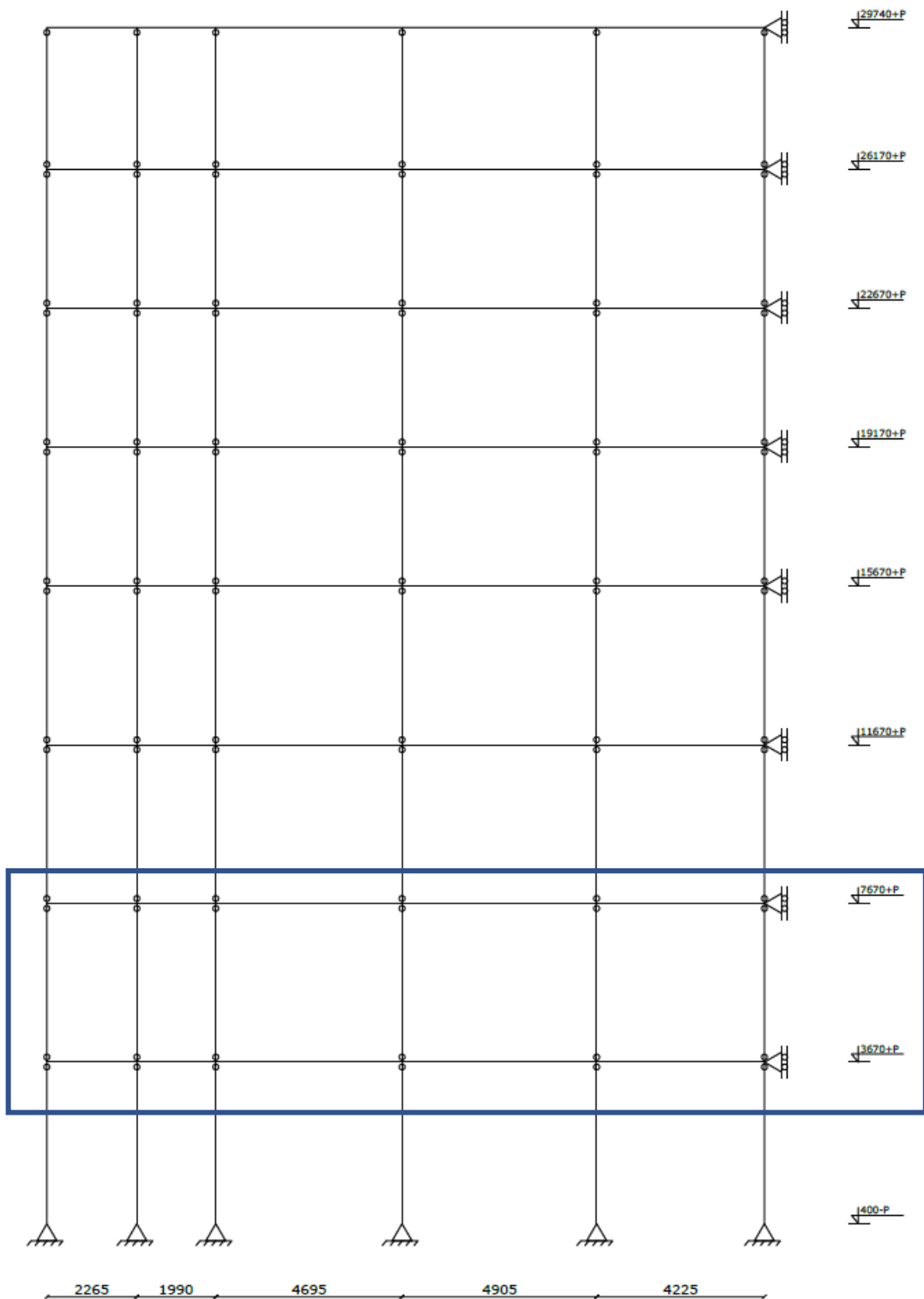
Verder kan aan de hand van een bezwijkanalyse de plastische vervorming van een ligger of raamwerk bepaald worden. Een bezwijkanalyse is een analyse die uitgevoerd wordt van een onderdeel van de constructie om erachter te komen wanneer deze bezwijkt. Door een bezwijkanalyse uit te voeren kan het bezwijkmechanisme bepaald worden. Een bezwijkmechanisme is de manier waarop het onderdeel kan bezwijken. Door het juiste bezwijkmechanisme te vinden kan de bezwijkbelasting of het plastisch moment bepaald worden. Wanneer men dit weet dan weet men precies hoe het onderdeel zal gaan bezwijken. Zo kan men bepalen of de constructie sterk genoeg is in buitengewone situaties zoals brand of bij een explosie.

5.3.2. Uitgangspunten voor de plastische berekeningen

In deze paragraaf worden de uitgangspunten voor de plastische berekeningen beschreven. De berekende waardes komen uit bijlage D. Als eerste is een schematisering gemaakt van het raamwerk. Zie figuur 33 voor de plaats in het gebouw. In figuur 34 is de schematisering van het raamwerk te zien.

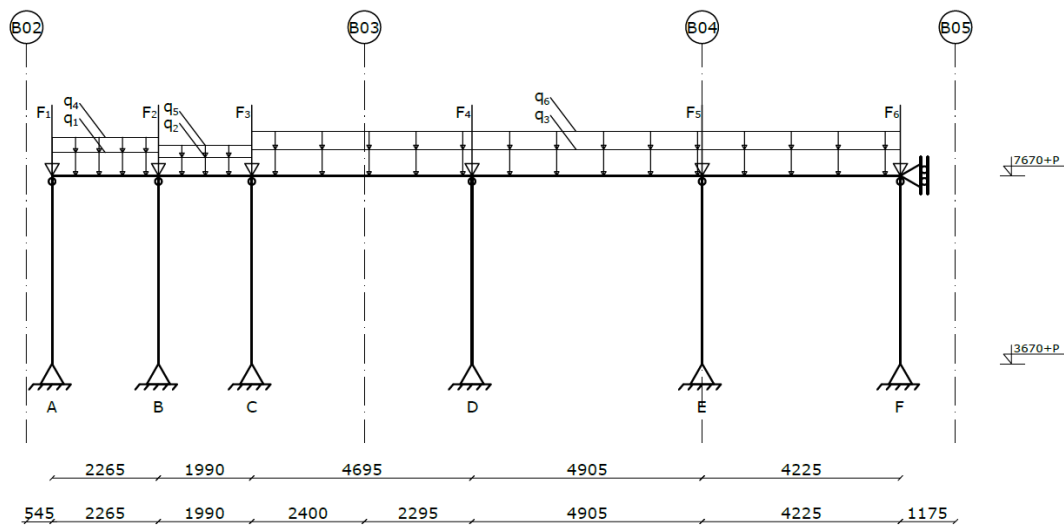


Figuur 33, plaats van het raamwerk aangegeven met de rode lijn in de plattegrond van laag 2, Overgenomen van Timo Frielink, 2018



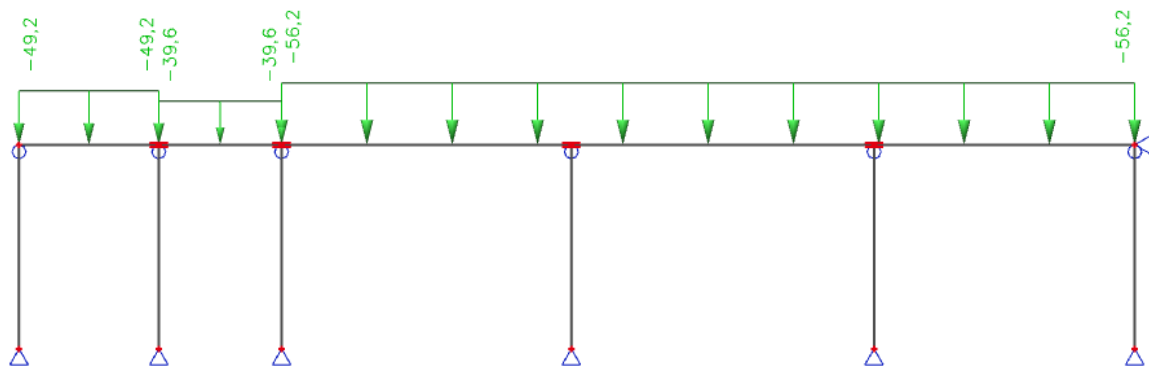
Figuur 34, raamwerk tussen as BA en BB

In figuur 35 is de schematisering van de ligger met de belastingen erop weergegeven.

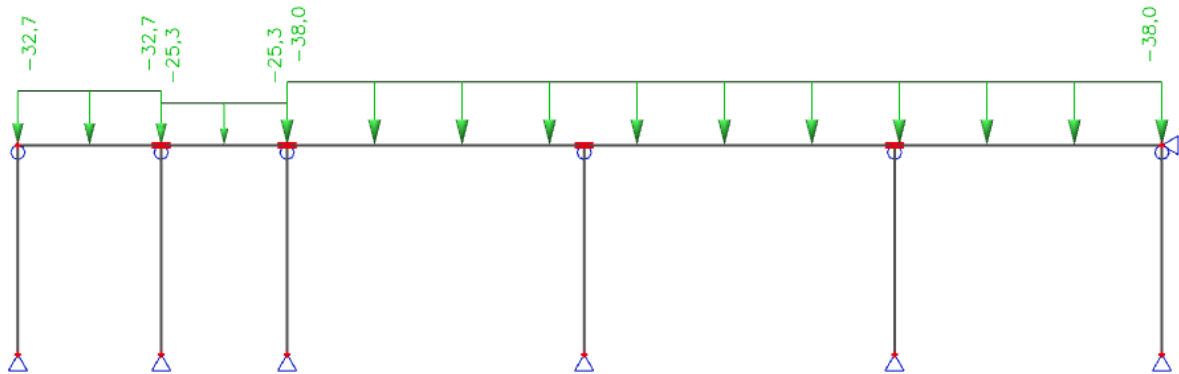


Figuur 35, Schematisering ligger laag 2 met bijbehorende belastingen

In Scia is dit raamwerk ingevoerd om de dwarskrachten en momenten van de ligger te berekenen. In de volgende twee figuren (figuur 36 en 37) zijn de ingevoerde belastingen op het raamwerk te zien. Zie hoofdstuk 5.1. uit bijlage D voor de berekening van de belastingen op de ligger.

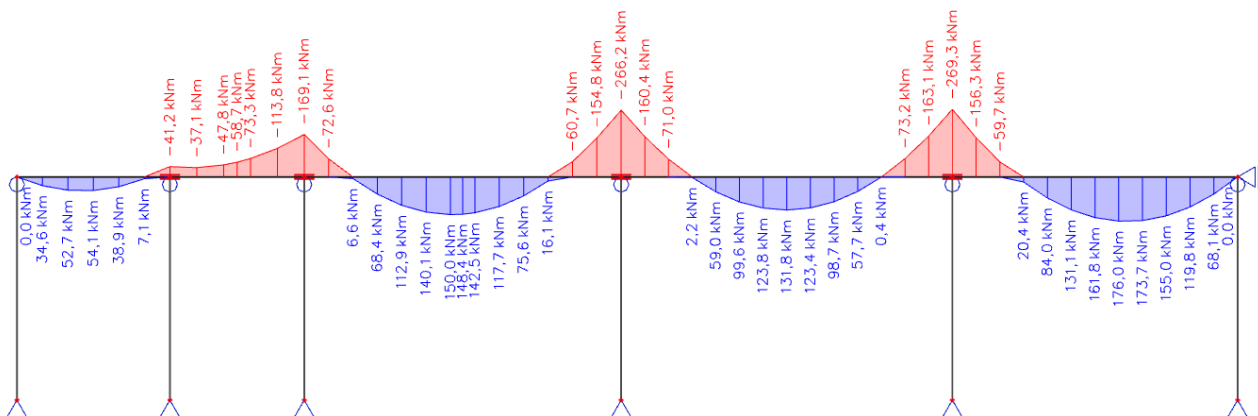


Figuur 36, Blijvende belasting op raamwerk



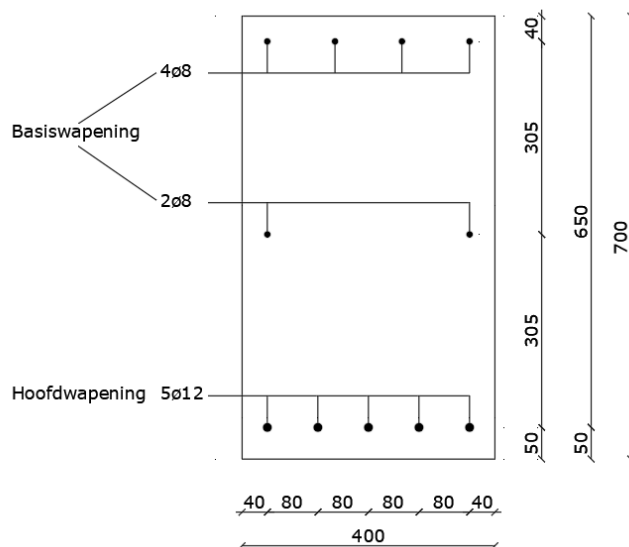
Figuur 37, Variabele belasting op raamwerk

Via Scia zijn voor de belangrijkste belastingcombinaties de N-, V- en M-lijn berekend. Hieronder is in figuur 22 de M-lijn van belastingcombinatie Fundamenteel b weergegeven. Dit is de belastingcombinatie met de grootste momenten. Aan de hand van deze M-lijn zal de wapening van de ligger worden berekend.



Figuur 38, M-lijn raamwerk belastingcombinatie fundamenteel b

In bijlage D is de wapening van de ligger en kolommen berekend. Met de berekende wapening zal doorgerekend worden voor de plastische vervorming.



Figuur 41, Doorsnede t.p.v. midden ligger D-E

Voordat het plastisch moment bij de doorsnede kan worden berekend moet eerste aan een eis uit de Eurocode worden voldaan. In de NEN-EN 1992-1-1 staat in hoofdstuk 5.6.1 dat de ductiliteit van doorsnedes voldoende moet zijn om een plastische berekening te maken. In hoofdstuk 5.6.2 staat dat de ductiliteit van de doorsnede als voldoende beschouwd mag worden als $X_u/d \leq 0,25$. In bijlage D is X_u berekend bij deze doorsnede (figuur 41). X_u is 46mm en d is 650.

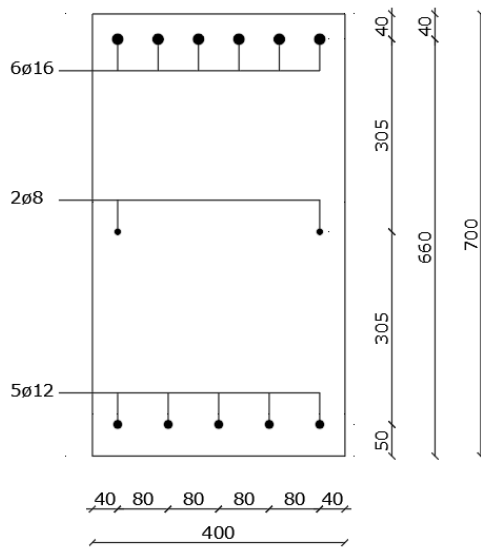
$$\frac{X_u}{d} \leq 0,25$$

$$\frac{46}{650} \leq 0,25$$

$0,07 \leq 0,25$ Hieruit blijkt dat $X_u/d \leq 0,25$ bij de doorsnede uit figuur 41. Dus kan een plastische berekening gemaakt worden van de doorsnede.

Uit de berekening van het plastische moment van de doorsnede komt een M_p van 154 kNm.

Dezelfde stappen worden nu gevolgd om het plastisch moment van de doorsnedes ter plaatse van de steunpunten te berekenen. In figuur 42 is de doorsnede van de ligger te zien ter plaatse van de steunpunten D en E van de ligger. Beide steunpunten hebben bijna hetzelfde moment en hebben dus dezelfde wapening. Hierdoor hoeft er maar voor een steunpunt het plastisch moment te worden berekend. Voor steunpunt D wordt het plastisch moment berekend.



Figuur 42, Doorsnede t.p.v. steunpunt D

Ook bij deze doorsnede moet eerst aan de eis uit de Eurocode worden voldaan. In bijlage D is X_u berekend bij deze doorsnede (figuur 42). X_u is 99mm en d is 660.

$$\frac{X_u}{d} \leq 0,25$$

$$\frac{99}{660} \leq 0,25$$

$0,15 \leq 0,25$ Hieruit blijkt dat $X_u/d \leq 0,25$ bij de doorsnede uit figuur 42. Dus kan een plastische berekening gemaakt worden van de doorsnede.

Uit de berekening van het plastische moment van de doorsnede komt een M_p van 320 kNm.

5.3.4. Plastische vervorming ligger

[91] Met het plastisch moment van de doorsnede is berekend wat de bezwijklast is van de ligger. Hierbij wordt ook bepaald bij welke last de plastische scharnieren in de ligger ontstaan. Deze ligger zal bezwijken als er drie plastische scharnieren zijn ontstaan. De plastische scharnieren ontstaan op de plaatsen met het grootste moment. Bij deze ligger zijn dat de steunpunten en het midden van de ligger. Door de drie scharnieren ontstaat een bezwijkmechanisme waardoor de ligger geen weerstand meer kan geven tegen de opgelegde belasting. Het berekenen van de bezwijklast kan op drie manieren:

- *De incrementele methode*

Bij de incrementele methode wordt gekeken waar de plastische scharnieren bij toenemende belasting ontstaan.

- *De evenwichtsmethode*

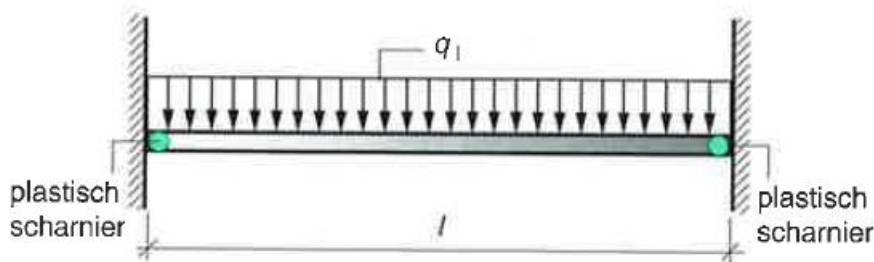
De evenwichtsmethode gaat uit van een aangenomen momentenverdeling in het bezwijkstadium waarbij nergens in de constructie de vloeigrens bereikt mag worden. Deze methode wordt alleen toegepast bij een statisch onbepaalde ligger, aangezien hij voor een statisch bepaalde ligger gelijk is aan de incrementele methode.

- *Virtuele arbeid*

De virtuele arbeidsmethode maakt gebruik van het principe dat bij het ontstaan van het bezwijkmechanisme de uitwendig verrichte arbeid gelijk moet zijn aan de inwendig gedissipeerde energie in de plastische scharnieren.

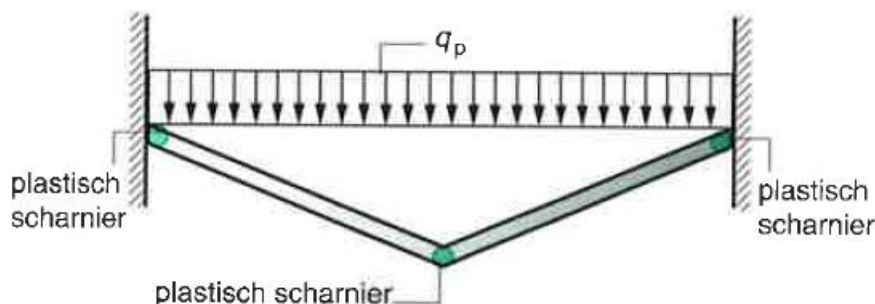
Bij de ligger is de bezwijklast berekend volgens de incrementele methode. In bijlage D is de volledige berekening te vinden. Voor het berekenen van de bezwijklast van de ligger is het plastische moment van 320 kNm gebruikt. Als eerste is de bezwijklast van de steunpunten, q_1 , berekend.

Uit de berekening is gekomen dat bij een bezwijklast, q_1 , van 160 kN/m ter plaatse van de steunpunten de eerste twee plastische scharnieren ontstaan (zie figuur 43). De ligger bezwijkt nog niet bij een bezwijklast van q_1 . De ligger heeft dus nog een reservedraagvermogen, ook wel redundantie genoemd.



Figuur 43, 1e vorming plastische scharniere, Overgenomen uit "Basisboek Toegepaste Mechanica" (p. 525) door J.W. Welleman, A. Dolfing en J.W. Hartman, 2002, Zoetermeer, ThiemeMeulenhoff bv, Copyright 2002, Uitgeverij ThiemeMeulenhoff bv

Vervolgens is het reservedraagvermogen, q_2 , berekend. Het reservedraagvermogen van de ligger is 53,3 kN/m. Daarna zijn de eerste bezwijklast, q_1 , en het reservedraagvermogen, q_2 , bij elkaar opgeteld. Dit leverde een maximale bezwijklast, q_p , op van 213 kN/m. Bij deze maximale bezwijklast ontstaat in de ligger het derde plastische scharnier in het midden van de ligger, zie figuur 44.



Figuur 44, Vorming plastisch scharnier midden in het veld, Overgenomen uit "Basisboek Toegepaste Mechanica" (p. 525) door J.W. Welleman, A. Dolfing en J.W. Hartman, 2002, Zoetermeer, ThiemeMeulenhoff bv, Copyright 2002, Uitgeverij ThiemeMeulenhoff bv

Na het bereiken van de maximale bezwijklast kan de ligger geen extra belasting meer opnemen. De ligger zal dan bezwijken.

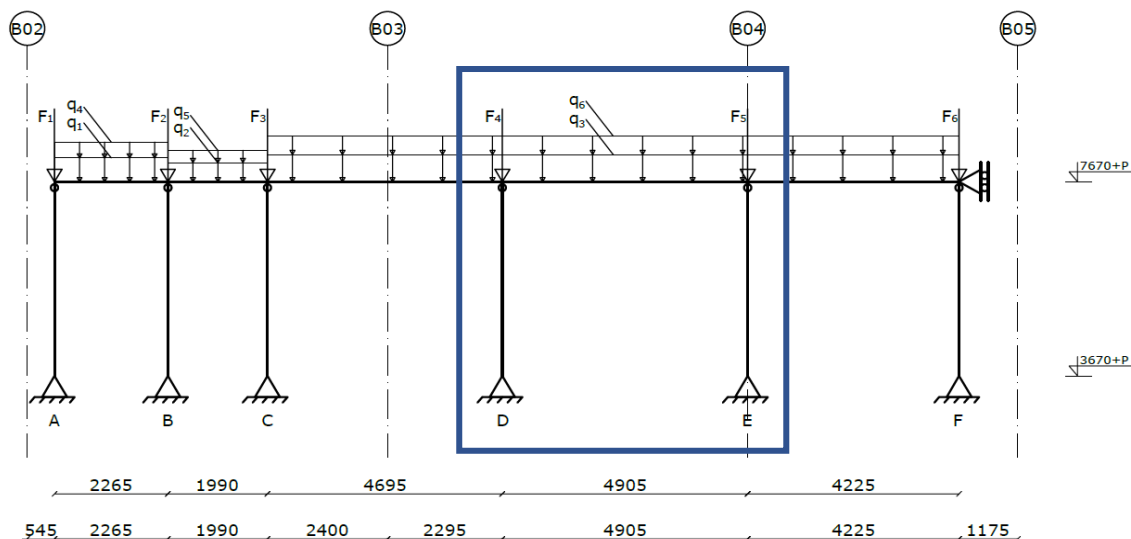
Met het plastische moment kan ook de maximale doorbuiging worden berekend. De volledige berekening hiervan staat in bijlage D. Als eerste wordt de doorbuiging w_1 berekend bij een bezwijkbelasting van q_1 . Uit de berekening komt een doorbuiging w_1 van 5,85mm. Bij doorbuiging w_1 ontstaan de plastische scharnieren bij de steunpunten.

Aan de hand van q_2 kan de doorbuiging w_2 worden berekend. Uit de berekening komt een doorbuiging w_2 van 9,76mm. Voor de totale doorbuiging bij worden w_1 en w_2 bij elkaar opgeteld tot w_p . Dit levert een doorbuiging w_p op van 15,61mm.

Na het ontstaan van de eerste twee plastische scharnieren is er al schade in de ligger ter plaatse van de steunpunten. Een plastische vervorming kan namelijk nooit meer terugkomen in de oorspronkelijke vorm. De ligger bezwijkt echter nog niet doordat de ligger een bepaald reservedraagvermogen, redundantie, heeft. Pas als het derde plastische scharnier is ontstaan bezwijkt de ligger.

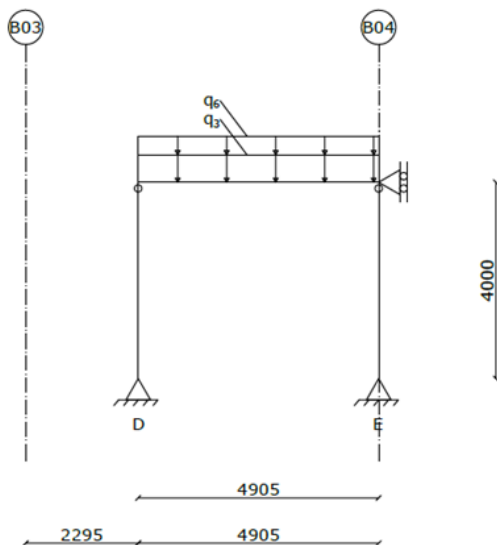
5.3.5. Plastische vervorming raamwerk

[92] In deze paragraaf kan er verder gekeken worden naar de plastische vervorming van het raamwerk van de ligger D-E met de kolommen eronder. Een deel van het raamwerk wordt genomen omdat het anders te veel wordt. Het deel van het raamwerk waar naar wordt gekeken is in figuur 45 aangegeven met de blauwe rechthoek. In figuur 46 is de schematisering van dit raamwerk (D-E) te zien.

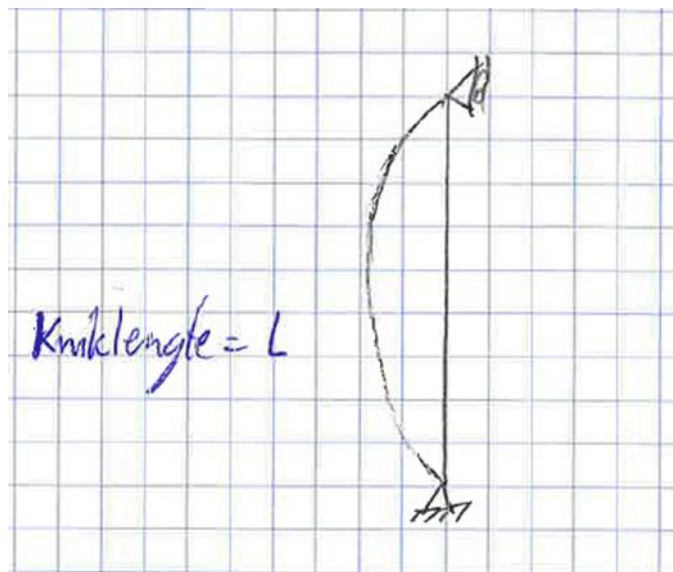


Figuur 45, Schematisering raamwerk met gekozen raamwerkdeel aangegeven door blauwe rechthoek

Eerst zijn de drie verschillende raamwerken weergegeven met het vervormingsgedrag van de kolommen. Verder is gekeken naar het plastische gedrag van de kolommen. Er zal duidelijk worden hoe de kolom aan de boven- en onderzijde is verbonden, hoe de M-lijn eruit ziet en waar plastische scharnieren kunnen ontstaan. De plastische scharnieren zijn in ieder figuur met een blauwe stip aangegeven. Door te begrijpen hoe een kolom plastisch vervormt kunnen de plastische scharnieren geplaatst worden in de kolom. Die kennis kan dan weer gebruikt worden bij de plastische vervorming van een raamwerk.



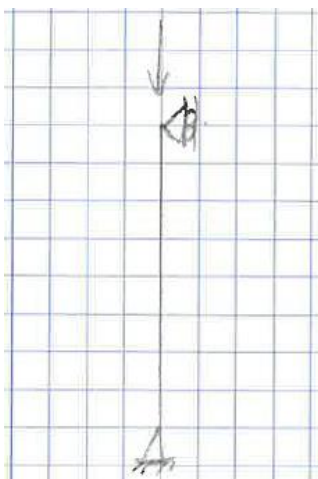
Figuur 46, Schematisering raamwerk 1, D-E



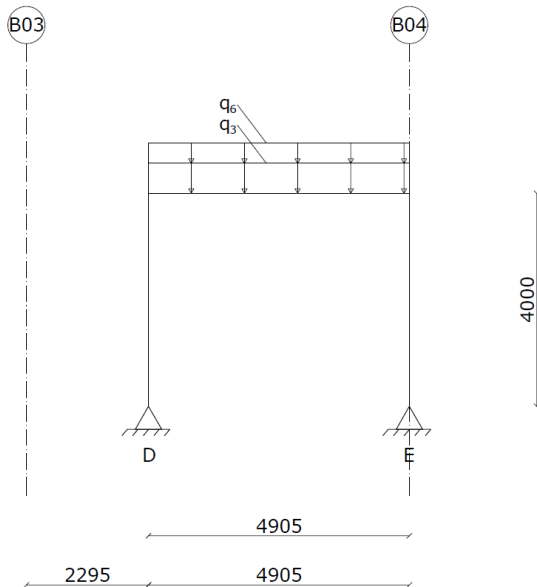
Figuur 47, Vervormingsgedrag kolom in raamwerk 1 met de kniklengte

Het vervormingsgedrag van de kolommen in het raamwerk samen met de ligger verschilt per verbinding die gekozen wordt. In de schematisering van raamwerk 1 (figuur 46) is de ligger scharnierend met de kolommen verbonden en zijn de kolommen scharnierend ingeklemd. In figuur 47 is het vervormingsgedrag te zien.

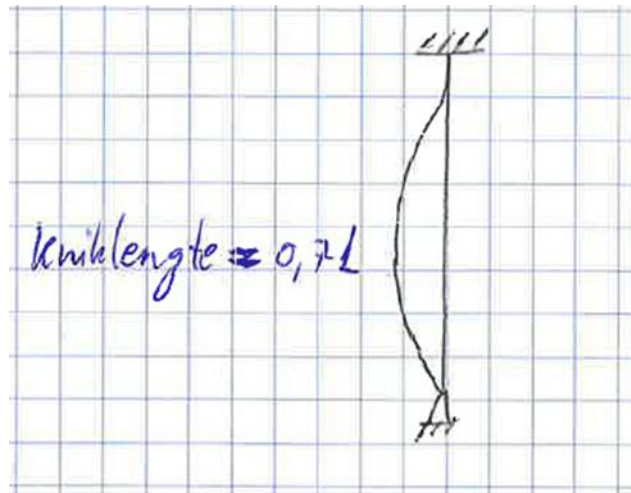
In figuur 48 staat de schematisering van een scharnierende kolom. In de kolom is er geen moment vanuit de ligger. Er kan bij deze kolom geen plastisch scharnier ontstaan omdat de kolom aan de boven- en onderzijde al scharnierend is verbonden. Hierdoor is er geen bezwijkmechanisme in de kolom.



Figuur 48, Schematisering kolom 1



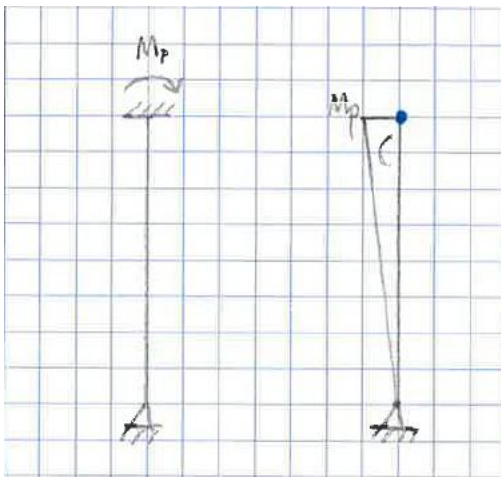
Figuur 49, Schematisering raamwerk 2, D-E



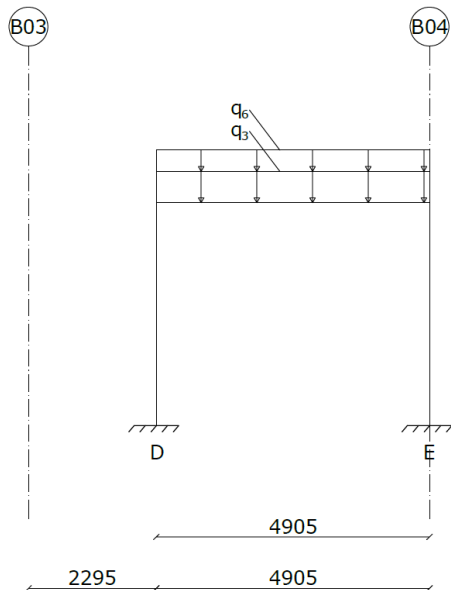
Figuur 50, Vervormingsgedrag kolom in raamwerk 2 met de kniklengte

De schematisering van raamwerk 2 is te zien in figuur 49. De ligger is moment vast met de kolommen verbonden en de kolommen zijn scharnierend ingeklemd. In figuur 50 is het vervormingsgedrag te zien. Raamwerk 2 is het raamwerk waarbij we de bezwijkanalyse gaan toepassen omdat deze schematisering het meest realistisch is voor het Maanhotel. Hierbij zal ook de meest gunstige uitkomst van de bezwijkanalyse uitkomen.

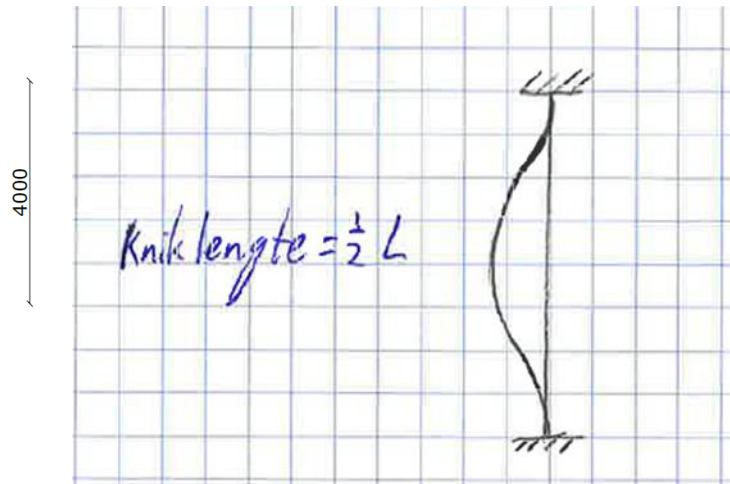
In figuur 51 staat de schematisering van een kolom die aan de onderzijde scharnierend is verbonden en aan de bovenzijde is ingeklemd. In de kolom is er een moment vanuit de ligger. Er kan bij deze kolom één plastisch scharnier ontstaan aan de bovenzijde omdat de kolom aan de bovenzijde is ingeklemd en aan de onderzijde al scharnierend is verbonden. Hierdoor is er bezwijkmechanisme in de kolom.



Figuur 51, Schematisering kolom 2



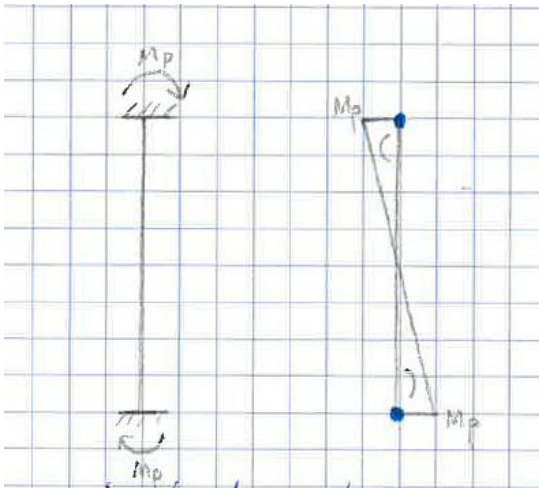
Figuur 52, Schematisering raamwerk 3, D-E



Figuur 53, Vervormingsgedrag kolom in raamwerk 3 met de kniklengte

In de schematisering van raamwerk 3 (figuur 52) is de ligger moment vast met de kolommen verbonden en zijn de kolommen ingeklemd. In figuur 53 is het vervormingsgedrag te zien.

In figuur 54 staat de schematisering van een kolom die aan de onder- en bovenzijde is ingeklemd. In de kolom is er een moment vanuit de ligger. Er kunnen bij deze kolom twee plastisch scharnier ontstaan omdat de kolom aan de boven- en onderzijde is ingeklemd. Hierdoor is er een bezwijkmechanisme in de kolom.

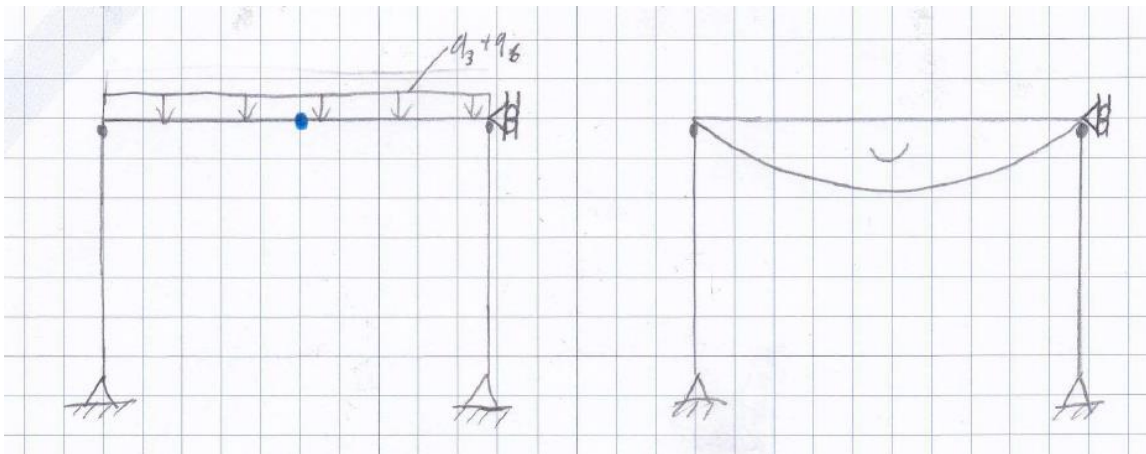


Figuur 54, Schematisering kolom 3

5.3.6. Bezwijkanalyse raamwerk

[92] In dit hoofdstuk wordt gekeken naar het plastische gedrag van het raamwerk. Het zal duidelijk worden waar de plastische scharnieren zitten in het raamwerk en wat de bezwijkmechanismes zijn per raamwerk. Van raamwerk 2 is verder de bezwijkanalyse uitgevoerd.

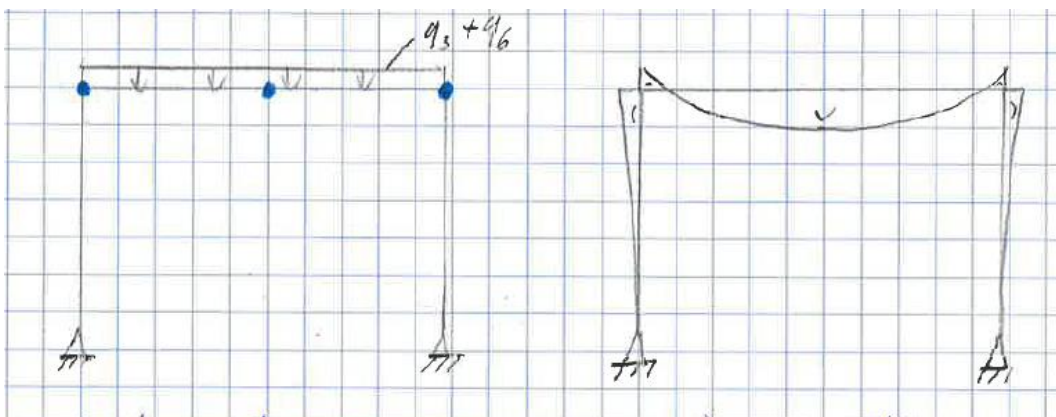
In figuur 55 is de schematisering en de M-lijn van raamwerk 1 te zien. In dit raamwerk is er maar op één plaats een plastisch scharnier mogelijk aangezien er in de steunpunten al scharnieren zitten. Deze is aangegeven met een blauwe stip in het midden van de ligger van het raamwerk. Door het plastische scharnier in het midden ontstaat het bezwijkmechanisme van dit raamwerk.



Figuur 55, Schematisering, M-lijn en plastische scharnier van raamwerk 1

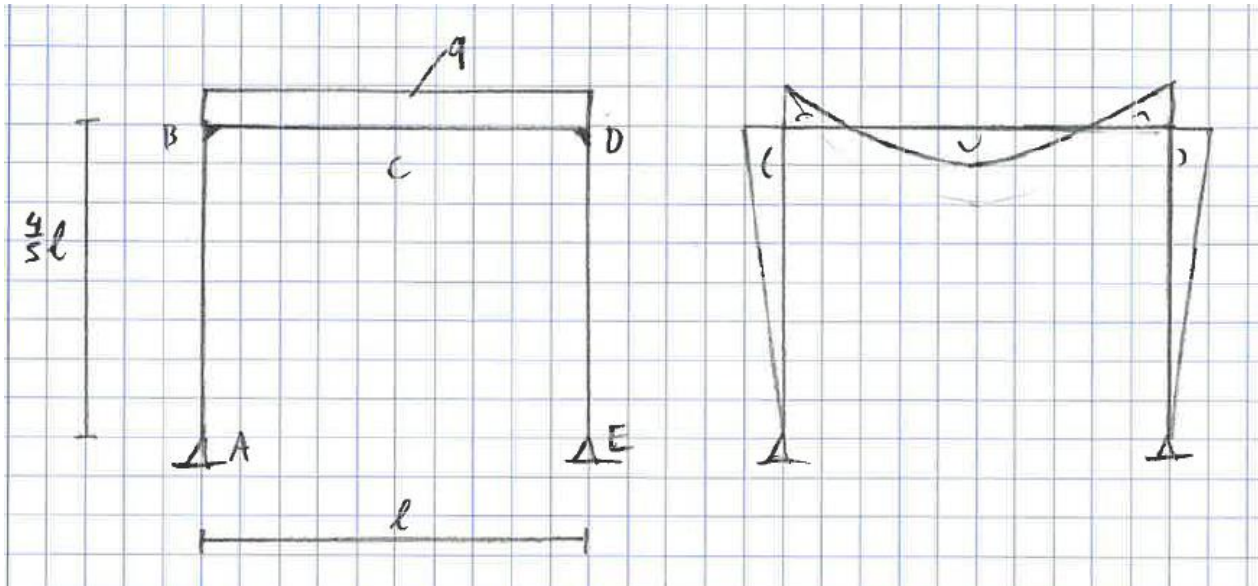
In figuur 56 is de schematisering en de M-lijn van raamwerk 2 te zien. Deze schematisering moet het meeste overeen komen met de werkelijkheid en dus is het zeker van belang om achter het bezwijkmechanisme van dit raamwerk te komen. Uit deze schematisering komt namelijk het gunstigste plastische moment.

In dit raamwerk zijn op drie plaatsen plastische scharnieren mogelijk. Deze zijn aangegeven met een blauwe stippen in het raamwerk. Er zijn bij dit raamwerk drie verschillende bezwijkmechanismes mogelijk. Om erachter te komen welk bezwijkmechanisme de maatgevende is zal moeten worden uitgezocht wat de bezwijkbelasting is per bezwijkmechanisme. Het bezwijkmechanisme met de kleinste bezwijkbelasting is het maatgevende bezwijkmechanisme.



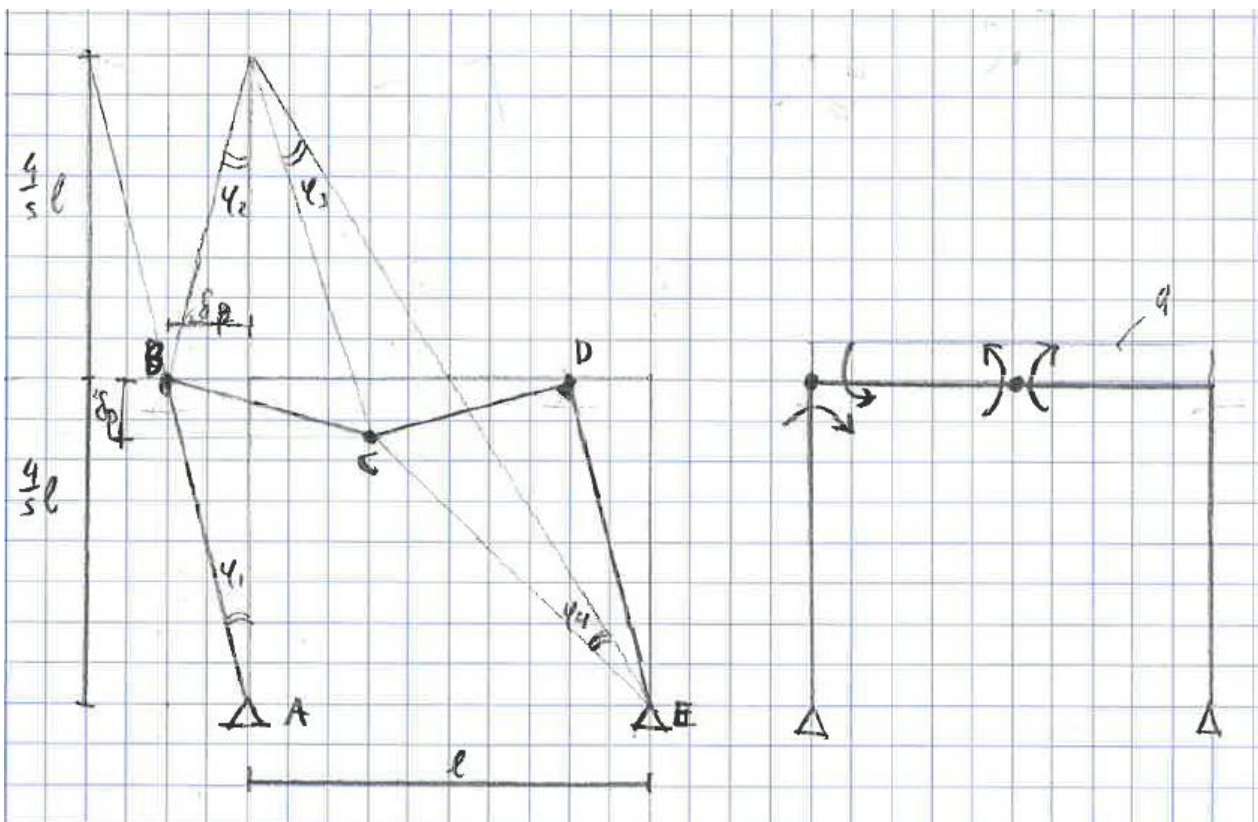
Figuur 56, Schematisering, M-lijn en plastische scharnieren van raamwerk 2

Om het bezwijkmechanisme te bepalen is er eerst een schematisering en een M-lijn gemaakt. Zie figuur 57.



Figuur 57, Schematisering en M-lijn en van raamwerk 2

Nu de schematisering en de M-lijn bekend is kan er gekeken worden naar bezwijkmechanisme 1. Ook wel een spatmechanisme genoemd. Bezwijkmechanisme 1 is in onderstaande figuur 58 weergegeven. De plastische scharnieren bevinden zich in dit bezwijkmechanisme in punt B en C.

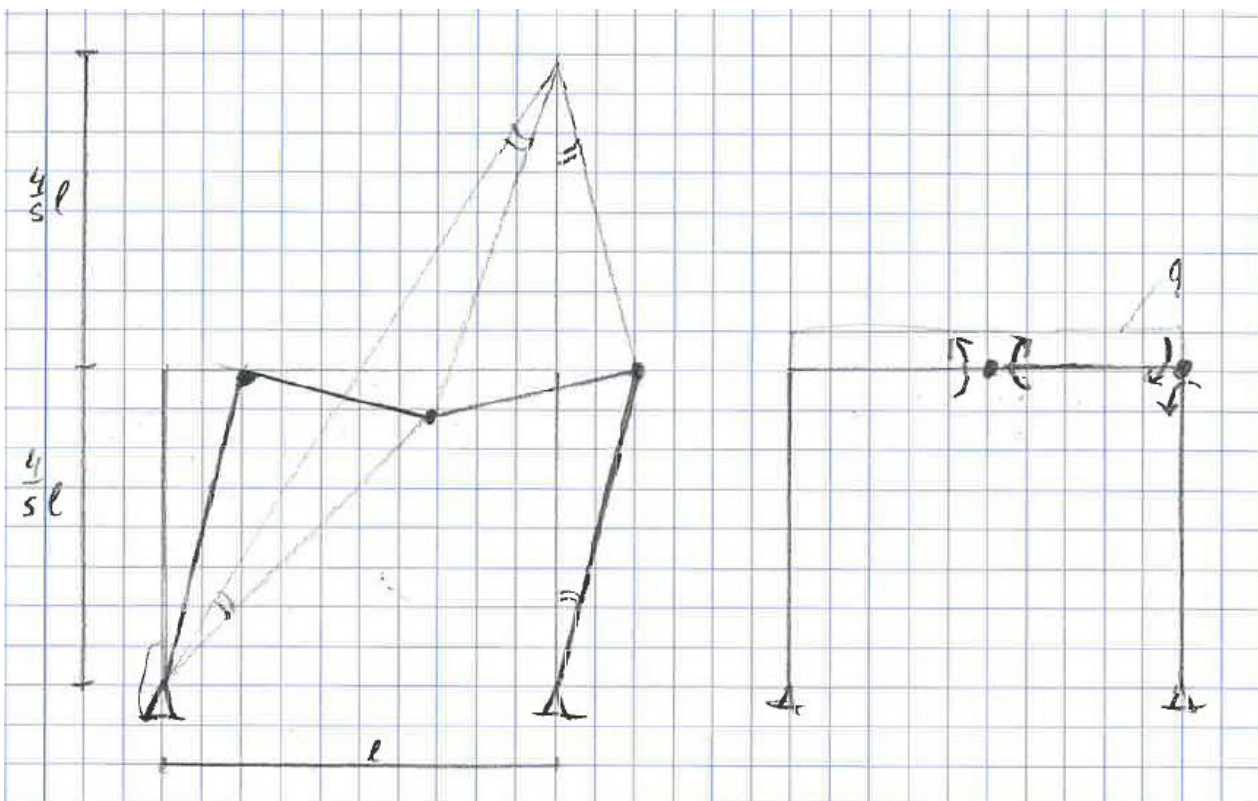


Figuur 58, Bezwijkmechanisme 1, raamwerk 2

In bijlage D is de volledige berekening te vinden voor dit bezwijkmechanisme. Uit de berekening komt een bezwijklast van:

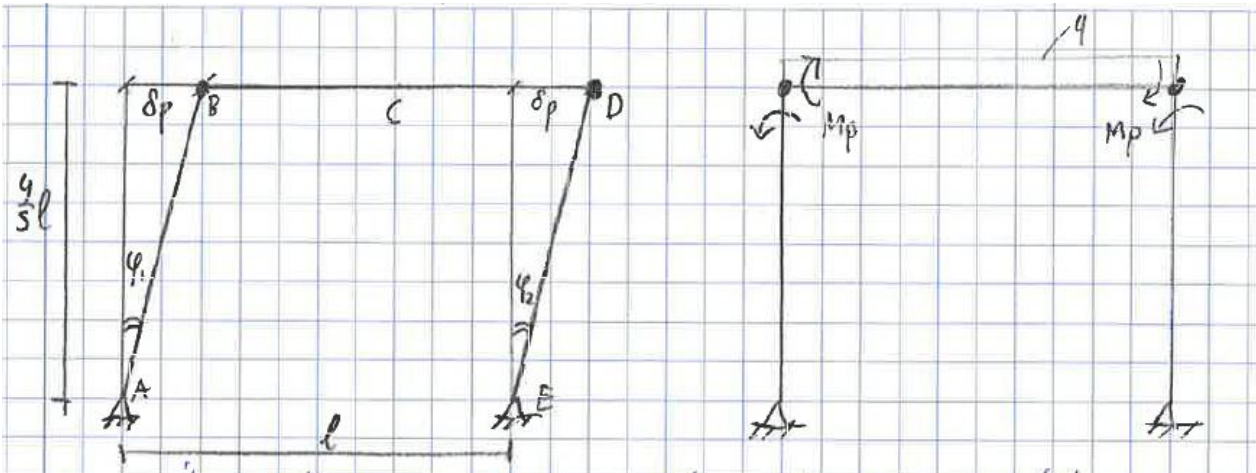
$$q = 18,0 \times \frac{M_p}{l^2}$$

De bezwijklast van bezwijkmechanisme 1 is nu bekend. Vervolgens kan er gekeken worden naar bezwijkmechanisme 2. Dit is ook een spatmechanisme. Hierbij zitten de plastische scharnieren in punt C en D. Bezwijkmechanisme 2 is in figuur 59 weergegeven.



Figuur 59, Bezwijkmechanisme 2, raamwerk 2

In figuur 59 is te zien dat bezwijkmechanisme 2 een spiegelbeeld is van bezwijkmechanisme 1. De bezwijklast van bezwijkmechanisme 2 is dus ook hetzelfde als bij bezwijkmechanisme 1. Als laatste kan er gekeken worden naar bezwijkmechanisme 3.



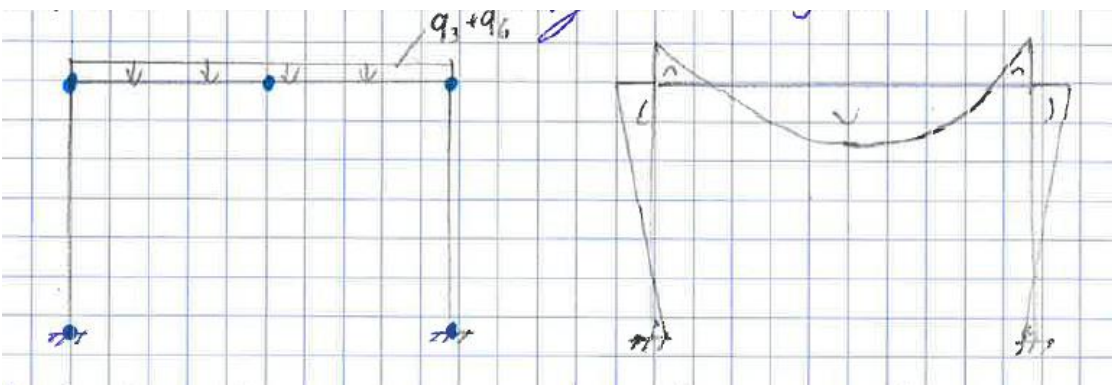
Figuur 60, Bezwijkmechanisme 3, raamwerk 2

Bezwijkmechanisme 3 (figuur 60) wordt ook wel een schrankmechanisme genoemd. Bij bezwijkmechanisme 3 zitten de plastische scharnieren in punt B en D. Bezwijkmechanisme 3 kan echter alleen plaatsvinden als er een horizontale kracht op het raamwerk staat. In dit geval is er geen horizontale kracht op het raamwerk en dus is bezwijkmechanisme 3 niet mogelijk.

Dus voor dit raamwerk zijn bezwijkmechanisme 1 en 2 maatgevend en kan doormiddel van de bezwijklast het plastische moment worden bepaald.

De bezwijkbelasting is bekend (zie paragraaf 5.3.3.) en aan de hand hiervan wordt het plastisch moment bepaald. Het berekende plastische moment van het raamwerk is 285 kNm.

In figuur 61 is de schematisering en de M-lijn van raamwerk 3 te zien. In dit raamwerk zijn op vijf plaatsen plastische scharnieren mogelijk. Deze zijn aangegeven met een blauwe stippen in het raamwerk. Er zijn bij dit raamwerk drie verschillende bezwijkmechanismes mogelijk. In bijlage D zijn de bezwijkmechanismes verder beschreven.



Figuur 61, Schematisering, M-lijn en plastische scharnieren van raamwerk 3

5.4. Plastische vervorming en brand

In dit hoofdstuk wordt inzicht gegeven in de combinatie van plastische vervorming en brand. Eerst wordt er gekeken naar de bezwijklast en brand. Hierbij zal de berekende bezwijklast uit hoofdstuk 5.3 vergeleken worden met de belasting tijdens brand. Daarna zal gekeken worden naar de kolom en balk bij brand. Hierbij wordt beschreven hoe tijdens brand de maximale bezwijklast berekend had moeten worden.

5.4.1. Bezwijklast en brand

De maximale bezwijkbelasting die in het berekeningsrapport is berekend zal nu worden vergeleken met de belasting bij brand. Bij dit onderzoek willen we namelijk weten wat de constructie doet bij brand.

De opgelegde belasting bij brand is 82,8 kN/m. Hier komt nog een klein deel eigen gewicht van 7 kN/m bovenop. Dus totaal staat er 89,8 kN/m op de ligger.

Volgens de belastingcombinaties zou er nog een belasting A_d bij komen, maar in het geval van brand is die belasting 0 kN/m. Dit is omdat brand in beginsel geen extra belasting geeft op de constructie. Pas als men ook kijkt naar de temperatuur en de spanningen die daarbij in de constructie kunnen ontstaan kan men een belasting geven aan A_d . Maar aangezien dit een tijdrovende berekening is, is dat voor dit onderzoek niet gedaan.

Voordat de eerste bezwijklast wordt bereikt en de plastische scharnieren in de steunpunten ontstaan is er dus een reserve van 70,2 kN/m. Met het extra reservedraagvermogen van de ligger erbij is er in totaal een reserve van 123,2 kN/m.

Er moet dus ruim twee keer zoveel belasting in een brand situatie op de ligger komen te staan wil de ligger bezwijken.

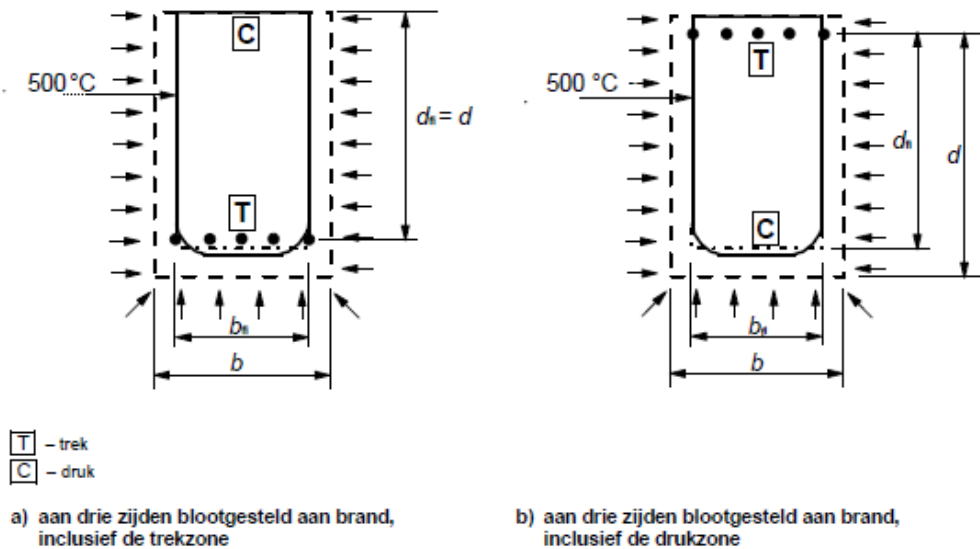
5.4.2. Kolom en balk bij brand

[66] In hoofdstuk 5.3 was voor de balk de standaard doorsnede genomen waarbij geen invloed van temperatuur aanwezig was. Als men een plastische berekening tijdens brand wil maken is dit niet de juiste doorsnede om mee te rekenen. Tijdens brand stijgt de temperatuur tot grote hoogte en kan men niet uitgaan van de temperatuur van 20 °C onder normale omstandigheden. In de Eurocode wordt ervan uitgegaan dat het beton zijn sterkte en stijfheid tot een temperatuur van 500 °C behoudt. De Eurocode heeft een methode om met de doorsnede tijdens brand te kunnen rekenen, namelijk de 500°-isothermmethode. In bijlage B03 is de 500°-isothermmethode beschreven.

Bij brand is de doorsnede van de balk gereduceerd. De buitenkant van de balk warmer is dan de binnenkant. Aan de buitenkant is de temperatuur wel 900 °C terwijl in het midden de temperatuur maar 100 °C is. Tot aan de grens van 500 °C kun je met de doorsnede rekenen. Daarbuiten is de temperatuur hoger dan 500 °C en levert dat deel geen bijdrage meer aan de sterkte en stijfheid van het beton. Dit deel moet dus buiten beschouwing worden gelaten bij het rekenen met een doorsnede in een brand situatie.

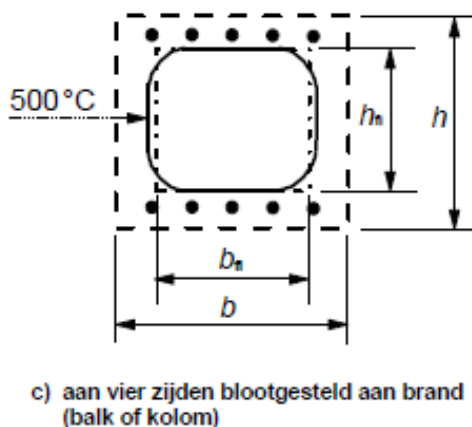
Bij de balk zou de doorsnede van het veld tussen steunpunt D en E er volgens figuur 63a uit kunnen zien. Bij de steunpunten D en E zou de doorsnede er volgens figuur 63b uit kunnen zien. Deze gereduceerde doorsnedes zouden voor een brand situatie een realistischere uitkomst geven van het plastische moment en de maximale bezwijklast. Het plastische moment zou lager zijn en daardoor is ook de maximale bezwijklast lager. De ligger

zou dus eerder bezwijken. Het kan dan zijn dat ligger dan al bezwijkt met de gewone blijvende en variabele belasting die erop staat.



Figuur 62, Gereduceerde balkdoorsnede van ligger D en E. Overgenomen uit 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.

Voor de kolom in het raamwerk kan dezelfde methode worden gebruikt om erachter te komen of deze sterk genoeg is in een brand situatie. De doorsnede van de kolom zou er volgens figuur 64 uitzien.



Figuur 63, Gereduceerde kolomdoorsnede van raamwerk D en E. Overgenomen uit 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.

5.4.3. Op brand dimensioneren of tegen brand bekleden

Voor de constructie in een brand situatie kan een keuze gedaan worden ten behoeve van de bescherming van de constructie. Want wat is beter in een brand situatie: op brand dimensioneren of tegen brand bekleden.

In paragraaf 5.4.2 werd duidelijk dat tijdens brand maar met een gereduceerde doorsnede gerekend mag worden. Dit heeft een grote impact op de belasting die de constructie kan dragen. De constructie bezwijkt dan eerder dan in een normale situatie. Om de constructie beter te beschermen tegen brand kunnen onder deze twee maatregelen worden genomen.

Als men de constructie bekleed met brandwerende materialen kan de doorsnede uit de normale situatie gebruikt worden. De bekleding beschermt het beton tegen de hitte van de brand. Verder gaat er niks verloren aan ruimte door grote constructie elementen.

Wanneer er wordt gedimensioneerd op brand zullen de dimensies van de constructie elementen groter worden. Dit kan nadelig uitpakken voor de functionaliteit van een gebouw aangezien je ruimte verliest aan extra grote kolommen en balken.

De kosten kunnen ook een rol spelen bij de keuze. Soms pakt de ene keuze gunstiger uit qua kosten. Er zal dan een goede overweging gemaakt moeten worden van de voor- en nadelen ten opzichte van de kosten.

Voor een hotel is het gunstiger als men de ruimte zo optimaal mogelijk kan gebruiken en indelen. De keuze voor het Maanhotel zou dus zijn om de constructie met brandwerende materialen te bekleden.

6. Conclusies en aanbevelingen

In dit hoofdstuk worden uit het literatuuronderzoek, en de deelhoofdstukken van het hoofdonderzoek de conclusies weergegeven. Verder zal de conclusie van het hele onderzoek beschreven zijn en zullen er aanbevelingen worden gedaan.

6.1. Conclusie literatuuronderzoek

In hoofdstuk 3 zijn de literatuurstudies en de voorstudie te vinden. Uit deze literatuurstudies zijn al een aantal conclusies gekomen die pas zijn gekomen in het hoofdonderzoek.

Uit de literatuurstudie over instortingen is gebleken dat de meeste gebouwen zijn ingestort door een aaneenschakeling van fouten. Door één van deze fouten weg te nemen, zoals het toevoegen van een tweede draagweg, wordt de kans op instorting verkleind. Het kan zijn dat een gebouw langer kan blijven staan zodat alle personen veilig uit het gebouw kunnen komen. Hierdoor kan een groot aantal slachtoffers voorkomen worden. Het kan ook zijn dat een gebouw niet instort of dat de schade beperkt blijft als er toch een redelijk deel van de constructie is weggefallen. Hieruit blijkt dus dat de tweede draagweg een belangrijke rol kan spelen bij de veiligheid van een gebouw.

De literatuurstudie naar de rekenmethodieken in een brand situatie liet verschillende rekenmethoden zien waarmee gerekend kan worden in een brandsituatie. In dit onderzoek is niet met deze methoden gerekend, maar is de uitkomst van hoofdstuk 5.3 verder beschouwd aan de hand van de 500°-isothermmethode. De kennis hiervan uit de literatuurstudie is hierbij van pas gekomen.

In de literatuurstudie naar de tweede draagweg en alternatieven is gebleken dat er verschillende ontwerpstrategieën zijn om een robuuste constructie te krijgen. De ontwerpstrategie die in dit onderzoek is toegepast is de indirecte strategie. In dit onderzoek is daarbij onderzoek gedaan naar de ductiliteit. Dus de capaciteit tot plastisch vervormen in de constructie.

6.2. Conclusie hoofdonderzoek

In hoofdstuk 5.1 is er onderzoek gedaan naar plastische vervorming in de Eurocode. Hierbij werd duidelijk dat er niet veel in de Eurocode staat over plastische vervorming bij beton. In de Eurocode staan voorwaarden en eisen waar je aan moet voldoen voor een plastische berekening volgens verschillende methodes. Om echt meer te weten hoe de plastische berekeningen gemaakt moeten worden is kennis nodig over plasticiteit. Deze kennis is vooral te vinden in studieboeken.

Vervolgens is in hoofdstuk 5.2 een literatuuronderzoek gedaan naar plasticiteit in internationale onderzoeken. In deze literatuur studie is meer duidelijk geworden hoe er in de wereld naar plasticiteit van beton wordt gekeken en wat de ontwikkelingen zijn op dat gebied. Een paar dingen vielen op tijdens deze literatuurstudie. Ten eerste was er niet zo heel veel over dit onderwerp te vinden in tegenstelling tot andere onderwerpen van beton. Verder gaan de meeste onderzoeken over het plasticiteits-schade model (plastic-damage model). Hiervan waren veel toepassingen onderzocht. Het belangrijkste hiervan is dat men met dit model de schade en het gedrag van beton kan voorspellen. Het is ook onderzocht of het model gebruikt kan worden om het gedrag van betonnen constructies te voorspellen tijdens brand.

Deze onderzoeken zijn natuurlijk erg belangrijk om meer over de plasticiteit en het gedrag van beton te kunnen begrijpen. Echter is het niet duidelijk of deze onderzoeken en de modellen die eruit voortkomen ook

daadwerkelijk gebruikt worden bij het ontwerpen van een constructie of in rekenprogramma's voor constructies. Het zou namelijk veel kunnen opleveren voor de robuustheid van een ontworpen constructie als de ontwikkelde modellen in de rekenprogramma's voor constructies zitten.

In hoofdstuk 5.3 is onderzocht hoe de constructie van het Maanhotel plastisch vervormt. Er is een raamwerk opgezet van de constructie. Hiervan is een deel uitgekozen waarmee verder gerekend is.

Eerst is het plastische moment van doorsnede van de ligger D-E bepaald. Het berekende plastische moment van de doorsnede is 320 kNm.

Daarna is verder gekeken hoe de ligger plastisch vervormt. Eerst zouden de eerste twee plastische scharnieren bij belasten in de steunpunten ontstaan. Hierdoor zou er al schade zijn ontstaan in de ligger ter plaatse van deze steunpunten. Een plastische vervorming kan namelijk nooit meer terugkomen in de oorspronkelijke vorm. De ligger zou echter nog niet bezwijken doordat de ligger een bepaald reservedraagvermogen, redundantie, heeft. Bij het derde plastische scharnier zou de ligger bezwijken. Dit zou gebeuren bij een bezwijkbelasting van 213 kN/m. Na het bereiken van deze maximale bezwijklast zou de ligger geen extra belasting meer kunnen opnemen. De ligger zou dan bezwijken.

Als laatste is gekeken naar de plastische vervorming van het raamwerk en is er een bezwijkanalyse gemaakt van raamwerk 2. Voor deze bezwijkanalyse van raamwerk 2 bleek het spatmechanisme maatgevend. Hierbij zou een plastisch moment van 285 kNm ontstaan in het raamwerk. Er is dus voorspeld hoe het raamwerk zal gaan bezwijken bij een maximale bezwijklast.

In hoofdstuk 5.4 is onderzocht wat er gebeurt bij plastisch vervormen van beton in een brand situatie.

Als eerste is de berekende maximale bezwijklast vergeleken met de belasting in een brand situatie. In principe geeft brand geen extra belasting op de ligger en wordt en alleen gerekend met de blijvende en variabele belasting. In die situatie zou de ligger niet bezwijken. Maar door brand kan er een extra zware belasting ontstaan door temperatuurspanningen in het beton dat de ligger toch plastisch kan gaan vervormen. Hiervoor is echter wel ruim twee keer zoveel belasting voor nodig. De betonnen ligger heeft namelijk redelijk wat reserve voordat deze zal gaan bezwijken. Deze reserve belasting die de ligger kan dragen wordt ook wel redundantie genoemd. Vervolgens is gekeken naar wat er gebeurt met een balk of kolom tijdens brand. Hieruit kwam voort dat in een brand situatie een gereduceerde doorsnede van de balk of kolom zou moeten worden gebruikt om berekeningen mee te maken. Deze gereduceerde doorsnede kan bepaald worden door de 500°-isothermmethode. Dat geldt dus ook voor de plastische berekeningen. Wanneer dat gedaan zou worden zou het plastisch moment en de bezwijklast lager zijn. De ligger zou dan eerder bezwijken.

In dit onderzoek naar de plastische vervorming bij beton binnen het constructief ontwerp is de impact van de plastische vervorming bij brand in het Maanhotel duidelijk geworden. In een normale situatie kan de constructie best veel hebben. De constructie heeft flink wat reservedraagvermogen. In een brand situatie moet er gerekend worden met een gereduceerde doorsnede van het beton waardoor de constructie minder reservedraagvermogen heeft. Wanneer dan met de extra temperatuurspanningen in het beton gerekend wordt kan het zijn dat de constructie tijdens brand bezwijkt. Door een bezwijkanalyse uit te voeren wordt dan ook duidelijk hoe de constructie bezwijkt. Dus door welk bezwijkmechanisme de constructie uiteindelijk zal gaan bezwijken. De constructie zal dus tegen brand beschermd moeten worden. De constructie kan op brand gedimensioneerd worden of men kan de constructie met brandwerende materialen bekleden.

In een volgend onderzoek zou de plastische vervorming in een brand situatie berekend kunnen worden om zo te kunnen aantonen dat de constructie wel of niet voldoet tijdens brand. Hiervoor is in dit onderzoek geen tijd meer geweest. Ook zou een groter deel van het raamwerk genomen kunnen worden om een vollediger beeld te krijgen van het gedrag van de constructie.

6.3. Aanbevelingen

Aan de hand van dit onderzoek kunnen een aantal aanbevelingen worden gedaan. Deze aanbevelingen zijn hieronder beschreven.

Voor de Eurocode kan er een aanbeveling worden gedaan met betrekking tot de plasticiteit. In de Eurocode is niet echt duidelijk aangegeven wanneer een plastische berekening gemaakt dient te worden. Ook wordt niet duidelijk wat de methoden voor een plastische berekening inhouden. Nu moet men voor meer informatie over een plastische berekening de studieboeken erbij pakken.

Het zou beter zijn wanneer deze punten duidelijker in de Eurocode beschreven stonden, zodat men niet eindeloos hoeft te zoeken. Er wordt dan ook geen tijd verspild wanneer duidelijk is wanneer wel of niet een plastische berekening gemaakt moet worden.

Voor het Maanhotel wordt aanbevolen om de constructie tegen brand te beschermen door deze te bekleden met brandwerende materialen. De functionaliteit van het hotel blijft hierbij gewaarborgd. Het is namelijk niet wenselijk als er ruimte voor gasten van het hotel verdwijnt door extra grote balken en kolommen. In een hotel is functionaliteit en optimaal gebruik van de ruimte erg belangrijk.

Hier kan wel bij worden gezegd dat wanneer de kosten van bekleden dermate hoog zijn er toch een overweging gemaakt moet worden voor dimensioneren op brand.

Verder is het ook een goede aanbeveling om vaker plastische berekeningen te maken voor het berekenen van een constructie in een brand situatie. Het is namelijk mogelijk om te voorspellen hoe een constructie bezwijkt en wat de maximale belasting is die de constructie kan dragen. Deze informatie kan handig zijn om te bepalen of men beter kan bekleden of dimensioneren op brand. Verder krijgt men meer inzicht in het gedrag van de constructie.

7. Literatuurlijst en informatiebronnen

7.1. Literatuurlijst

- [1] Van Herwijnen, Frans (2009). *Leren van instortingen*. Zoetermeer: Bouwen met staal.
- [2] 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>
- [3] Rijnders, Berjo & Geurtsen, Eva (2011). *Tweede draagweg in de praktijk*. Arnhem: HAN.
- [4] Vambersky, Jan (2015). *Robuustheid van constructies*. Cement, 4, 11-15.
- [5] Terwel, Karel (2015). *Robuustheid is geen unity-check*. Cement, 4, 4-8.
- [6] Janssen, Bart & Janssen, Tjerk & Lamers, Martijn (2013). *Voorkomen is beter dan genezen*. Cement, online, 2-5.
- [7] Rijnders, Berjo & Geurtsen, Eva (2012). *Tweede draagweg in de praktijk*. Cement, online, 2-5.
- [8] Van Dijk, Menno (2012). *Voortschrijdende instorting*. Cement, online, 1-5.
- [9] De Boer, J.N. (2012). *Tweede draagweg van een hoekveld in prefab beton*. Eindhoven: TU/Eindhoven.
- [10] Bos, F.P. (2008). *Veilig construeren met glas*. Cement, 2, 9-13.
- [11] Engels, A. (2005). *Risicobeheersing bij ontwerpen van gebouwen*. Cement, 3, 24-27.
- [12] Millar, Darin & Falger, Mischa (2017). *Performance based fire engineering*. Cement, 8, 36-40.
- [13] Auteur onbekend (2007). *Kasteel of kaartenhuis*. Den Haag: VROM.
- [14] Lottman, Bas & Snel, Aryen & Kaalberg, Frank (2017). *Spatmechanisme bepalend voor brandveiligheid tunnels*. Cement, 8, 26-35.
- [15] Mulder, Sven & Kraak, Jan (2014). *Opgewarmd of uitgekookt?*. Cement, 8, 70-79.
- [16] Van Coile, Ruben (2011). *Brandveiligheid betonelementen*. Cement, , 1-4.
- [17] Van Dijk, Menno (2011). *Voortschrijdende instorting bij betonconstructies*. Eindhoven: TU/Eindhoven.
- [18] Lagendijk, Paul & Mulder, Sven (2011). *Brandwerendheid kanaalplaatvloeren*. Cement, 8, 71-81.
- [19] Pielkenrood, A.P. (2011). *Beoordeling van kanaalplaatvloeren bij brand*. Geraadpleegd op 6 februari 2018, van <https://www.cementonline.nl/artikel/beoordeling-van-kanaalplaten-bij-brand>
- [20] Kleinman, Cees & Linssen, Jacques (2011). *Brand en kanaalplaatvloeren*. Cement, 5, 4.
- [21] Hordijk, Dick & Gijsbers, Jan & Both, Kees & Klein-Holte, Ronald (2011). *Nieuwe maatregelen kanaalplaatvloeren (1)*. Cement, 5, 20-31.
- [22] Klösters, Gerry & Klein-Holte, Ronald & Van Dongen, Ad (2011). *Nieuwe maatregelen kanaalplaatvloeren (2)*. Cement, 5, 32-39.
- [23] Van Herpen, Ruud (2009). *Brandveiligheid hoogbouw*. Cement, 7, 38-43.
- [24] Van Acker, Arnold (2009). *Brandveiligheid kanaalplaatvloeren*. Cement, 7, 10-17.
- [25] Welling, Wim & Van Paassen, Aad (2009). *Brand in parkeergarage*. Cement, 7, 4-8.
- [26] Werkgroep constructieve veiligheid, (2011). *Compendium Aanpak Constructieve Veiligheid*. Rijswijk: QuantasArtoos BV.
- [27] Vervuurt, A.H.J.M. & Breunese, A.J. (2006). *Spatgedrag van beton bij brand*. Cement, 7, 70-73.
- [28] Bouquet, G.Chr. (2006). *Brandveilig ontwerpen in beton*. Cement, 7, 22-24.
- [29] Mans, D.G. (2007). *Leren van instortingen*. Cement, 4, 24-27.
- [30] Van den Bos, Ab & Joostensz, Ostar (2009). *Brandsimulatie op beton*. Cement, 7, 34-37.
- [31] Bolle, Simon (2009). *Progressive collapse indicator*. Delft: TU/Delft.

- [32] Lagendijk, Paul & Van der Veen, Cor & Braam, René (2007). *Brand en de Eurocode 2*. Cement, 7, 54-60.
- [33] Vervuurt, Adri & Brekelmans, Jan & Breunese, Arnoud & Erich, Bart (2009). *Spatgedrag betonconstructies*. Cement, 7, 45-49.
- [34] Anzion, Danny & Den Ouden, Mark & Winnen, Leonique (2012). *Betonconstructies bij brand*. Veenendaal: HAN & Bartels ingenieurs voor bouw & infra.
- [35] Vambersky, J.N.J.A. & Sagel, R. (1997). *De tikkende tijdbom onder de bouw (I)*. Cement, 3, 24-26.
- [36] Vambersky, J.N.J.A. & Sagel, R. (1997). *De tikkende tijdbom onder de bouw (II)*. Cement, 6, 52-53.
- [37] Vambersky, J.N.J.A. & Sagel, R. (1997). *De tikkende tijdbom onder de bouw (III)*. Cement, 9, 22-23.
- [38] 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
- [39] Eggink - Eilander, S. (2013). *Brandveiligheidsinstallaties in gebouwen*. Den Haag: Sdu uitgevers.
- [40] Van Zeeland, H. H. (2003). *Een brandveilig gebouw bouwen*. Den Haag: VNG uitgevers.
- [41] Levy, Matthys & Salvadori, Mario (2002). *Why buildings fall down*. New York: WW Norton & Company.
- [42] Braam, C.R. (2010). *Ontwerpen in gewapend beton, deel 4*. s-Hertogenbosch: Aeneas.
- [43] Hamerlinck, A.F. (2010). *Brand*. Zoetermeer: Bouwen met staal.
- [44] Tromp, A.J. & Van Mierlo, R.J.M. (2014). *Fire Safety Engineering*. Delft: Eburon.
- [45] Huijben, Rob (2014). *Parkeergarage als visitekaartje*. Cement, 8, 46-51.
- [46] Campbell, Peter (2001). *Learning from Construction Failures: Applied Forensic Engineering*. z.p.: Wiley.
- [47] Wijte, Simon (2015). *Eisen aan robuustheid*. Cement, 4, 16-22.
- [48] 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
- [49] 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
- [50] Pope, Roger (2006). *Lessons from Madrid*. Geraadpleegd op 12 februari 2018, van <http://www.carba.co.uk/wp-content/uploads/Lessons-from-Madrid.pdf>
- [51] 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_windsortower_santander_06.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [52] 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>
- [53] 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
- [54] 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>

- [55] 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>
- [56] El Kamari, Y. & Raphael, W. & Chateauneuf, A. (2015). *Reliability study and simulation of the progressive collapse of Roissy Charles de Gaulle Airport*. , , .
- [57] 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
- [58] Notenboom, Ben (2016). *Onderzoek naar oorzaak instorting pand Markt 31 's-Hertogenbosch*. Geraadpleegd op 12 februari 2018, van https://www.s-hertogenbosch.nl/uploads/media/Onderzoeksrapport_BouwQ.pdf
- [59] Auteur onbekend (2014). *Brandweerstatie 2013*. Geraadpleegd op 15 februari 2018, van <https://www.cbs.nl/NR/rdonlyres/A42E330D-EEA7-469B-A1DC-F3721CCAB2AF/0/brandweerstatie2013.pdf>
- [60] Denoël, J.F. (2006). *Beton en brand*. Cement, 7, 31-35.
- [61] Van der Zanden, J.H. & Van der Zanden, T.P. (1995). *Hoofdkantoor Unidek Gemert*. Bouwen met staal, 123, 40-46.
- [62] Evers, H.B. (1970). *Gebouwen voorzien van met water gevulde stalen kolommen*. Bouwen met staal, 14, 12-13.
- [63] Ketel, J.A & Van Vliet, H.A. (1999). *Waterkoeling maakt kantoorgebouw brandveilig*. Bouwen met staal, 148, 30-35.
- [64] De Leeuw, Kees & Brouwers, Roel (2013). *Zwaar en licht gecombineerd*. Cement, 2, 58-64.
- [65] Normcommissie 351 001 "Technische Grondslagen voor Bouwconstructies". (2011, 1 december). *NEN-EN 1990+A1+A1/C2: Eurocode: Grondslagen van het constructief ontwerp*. Geraadpleegd op 20 februari 2018, van <https://connect.nen.nl/Standard/Detail/162984?compId=11921&collectionId=0>
- [66] 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*. Geraadpleegd op 23 februari 2018, van <https://connect.nen.nl/Standard/Detail/160413?compId=11921&collectionId=0>
- [67] 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*. Geraadpleegd op 23 februari 2018, van <https://connect.nen.nl/Standard/Detail/161436?compId=11921&collectionId=0>
- [68] 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*. Geraadpleegd op 24 februari 2018, van <https://connect.nen.nl/Standard/Detail/207228?compId=11921&collectionId=0>
- [69] 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*. Geraadpleegd op 24 februari 2018, van <https://connect.nen.nl/Standard/Detail/158489?compId=11921&collectionId=0>
- [70] 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*. Geraadpleegd op 23 februari 2018, van <https://connect.nen.nl/Standard/Detail/164759?compId=11921&collectionId=0>

- [71] 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*. Geraadpleegd op 26 februari 2018, van <https://connect.nen.nl/Standard/Detail/167148?compId=11921&collectionId=0>
- [72] 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>
- [73] Auteur onbekend (2013). *Werken met Fire Safety Engineering*. Geraadpleegd op 7 maart 2018, van <http://www.sbrcur.net.nl/producten/publicaties/werken-met-fire-safety-engineering>
- [74] De Jong, Aldo & Hasselaar, Bas (2012). *Brandveiligheid: Ontwerpen en toetsen - deel C*. Rotterdam: Deckerssnoeck.
- [75] Franken, Linda (2017). *Hoge Veer Bastion*. Venlo: Volantis BV.
- [76] 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>
- [77] Taerwe, L. (2006). *Brandwerendheid betonconstructies volgens de Eurocodes*. Cement, 7, 36-42.
- [78] Van den Bossche, G. (2008). *Bepaling van de reststerkte van een betonconstructie blootgesteld aan brand*. Cement, 2, 74-76.
- [79] 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
- [80] Denoël, J.F. (2006). *Brandbescherming door betonconstructies*. Geraadpleegd op 22 maart 2018, van http://www.febelcem.be/fileadmin/user_upload/dossiers-ciment-94-08/nl/37_nl.pdf
- [81] Bouts, Ruud (2016). *Hoofdberekening bouwdeel B*. Venlo: Volantis BV.
- [82] 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
- [83] Haven, Jolanda (2008). *Onderzoek vluchtgedrag*. GRIP, 11, 269-299.
- [84] Heezemans, J.J. (2012). *Het Voorkomen van Voortschrijdende Instorting bij Prefab Betonconstructies*. Eindhoven: TU/Eindhoven.
- [85] 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>
- [86] Gernay, T. & Franssen, J. (2014). *A plastic-damage model for concrete in fire: Applications in structural fire engineering*. Fire Safety Journal, 71, 268-278.
- [87] Grassl, P. & Jirásek, M. (2006). *Damage-plastic model for concrete failure*. International Journal of Solids and Structures, 43, 7166-7196.
- [88] Abu Al-Rub, R.K. & Kim, S. (2010). *Computational applications of a coupled plasticity-damage constitutive model for simulating plain concrete fracture*. Engineering Fracture Mechanics, 77, 1577-1603.
- [89] George, J. & Kalyana Rama, J.S. & Siva Kumar, M.V.N. & Vasan, A. (2016). *Behavior of Plain Concrete Beam subjected to Three Point Bending using Concrete Damaged Plasticity (CDP) Model*. Materials Today Proceedings, 4, 9742-9746.
- [90] Normcommissie 351 001 "Technische Grondslagen voor Bouwconstructies". (2011, 1 december). *NEN-EN 1992-1-1+C1: Eurocode 2: Ontwerp en berekening van betonconstructies – Deel 1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen*. Geraadpleegd op 24 februari 2018, van <https://connect.nen.nl/Standard/Detail/158489?compId=11921&collectionId=0>
- [91] Welleman, J.W. & Dolfing, A. & Hartman, J.W. (2002). *Basisboek Toegepaste Mechanica*. Zoetermeer: ThiemeMeulenhoff bv.

- [92] Hartsuijker, C. (2004). *Toegepaste mechanica 3 Statisch onbepaalde constructies en Bezwijkanalyse*. Den Haag: Academic Service.

7.2. Figuren

- Media Groep Limburg. (2017). *Opdrachtgever: Maanhotel Heerlen wordt gewoon gebouwd*. Geraadpleegd op 8 februari 2018, van https://www.limburger.nl/cnt/dmf20170710_00043208/opdrachtgever-maanhotel-heerlen-wordt-gewoon-gebouwd
- De Erfgoedstem. (2016). *Den Bosch overweegt kavel ingestort pand te kopen*. Geraadpleegd op 12 februari 2018, van <https://erfgoedstem.nl/bosch-overweegt-kavel-ingestort-pand-kopen/>
- Spierts, T. (2016). *Instorten Pearle Den Bosch gevolg van fout uit 1992: houten wandje als draagmuur*. Geraadpleegd op 12 februari 2018, van <http://www.omroepbrabant.nl/?news/252356912/Instorten+Pearle+Den+Bosch+gevolg+van+fout+uit+1992+houten+wandje+als+draagmuur.aspx>
- McAllister, Therese & Corley, Gene (2002). *Word 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>
- One Stop Shop in Structural Fire Engineering. (2018). *The Windsor Tower Fire, Madrid*. Geraadpleegd op 12 februari 2018, van <http://www.mace.manchester.ac.uk/project/research/structures/strucfire/CaseStudy/HistoricFires/BuildingFires/default.htm>
- BAM Bouw en Techniek. (2017). *Aangenaam parkeren bij Eindhoven Airport*. Geraadpleegd op 8 februari 2018, van <https://www.bambouwentechniek.nl/nieuws/2017/5/aangenaam-parkeren-bij-eindhoven-airport>
- Studio 040. (2017). *Deel nieuwe parkeergarage Eindhoven Airport ingestort*. Geraadpleegd op 8 februari 2018, van <https://www.studio040.nl/deel-nieuwe-parkeergarage-eindhoven-airport-ingestort/content/item?1047859>
- Tromp, A.J. & Van Mierlo, R.J.M. (2014). *Fire Safety Engineering* (2e gewijzigde druk). Delft: Eburon
- Denoël, J.F. (2006). *Beton en brand*. Aeneas Media.
- Denoël, J.F. (2006). *Brandwerendheid van betonconstructies volgens de Eurocodes*. Aeneas Media.
- Normcommissie 351 001 "Technische Grondslagen voor Bouwconstructies". (2011). *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*. Geraadpleegd op 10 mei 2018, van <https://connect.nen.nl/Standard/Detail/160413?compId=11921&collectionId=0>
- Hamerlinck, A.F. (2009). *FSE van constructies in praktisch perspectief*. Bouwen met Staal
- Denoël, J.F. (2007). *Brandveiligheid en betonconstructies*. FEBELCEM.
- Normcommissie 351 001 "Technische Grondslagen voor Bouwconstructies". (2011). *NEN-EN 1991-1-2+C1: Eurocode 1: Belastingen op constructies – Deel 1-2: Algemene belastingen – Belasting bij brand*. Geraadpleegd op 14 mei 2018, van <https://connect.nen.nl/Standard/Detail/160413?compId=11921&collectionId=0>
- Normcommissie 351 001 "Technische Grondslagen voor Bouwconstructies". (2011). *NEN-EN 1991-1-7+C1+A1: Eurocode 1: Belastingen op constructies - Deel 1-7: Algemene belastingen - Buitengewone belastingen: stootbelastingen en ontploffingen*. Geraadpleegd op 20 april 2018, van <https://connect.nen.nl/Standard/Detail/207228?compId=11921&collectionId=0>

J.W. Welleman, A. Dolfing en J.W. Hartman. (2002). *Basisboek Toegepaste Mechanica*. Zoetermeer: ThiemeMeulenhoff bv

Normcommissie 351 001 "Technische Grondslagen voor Bouwconstructies". (2011). *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*. Geraadpleegd op 28 mei 2018, van <https://connect.nen.nl/Standard/Detail/160413?compId=11921&collectionId=0>

Bijlage A. Constructieve analyse

Bijlage B. Literatuurstudie

Bijlage C. Voorstudie

Bijlage D. Berekeningsrapport

Bijlage E. Plattegronden, doorsneden en details