

TWEEDE DRAAGWEG IN DE
PRAKTIJK

Berjo Rijnders
Eva Geurtsen

ENCI
studie
prijs
2011

Hogeschool van Arnhem en Nijmegen
Bouwkunde

in samenwerking met:
Iv-industrie

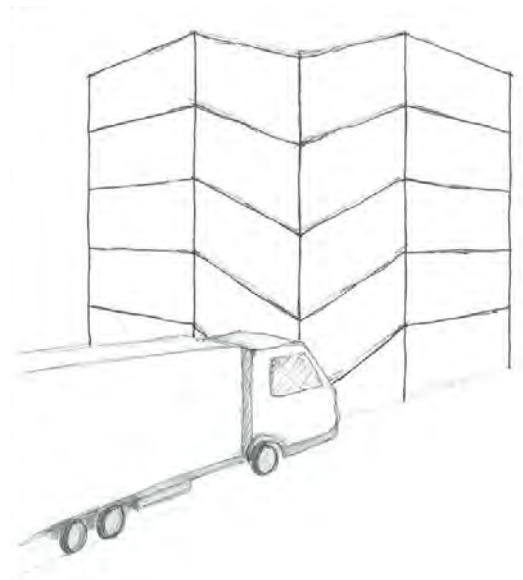
begeleiders:
ing. K. van der Zijden
ing. J. Rikken

Hoofdrapport

AFSTUDEEROPDRACHT HTS BOUWKUNDE

Tweede draagweg in de praktijk

Datum:
31-05-2011



Groepsamenstelling:

Berjo Rijnders
Studentennummer: 43 44 75
Eva Geurtsen
Studentennummer: 44 12 19

Verbonden aan:

Hogeschool van Arnhem en Nijmegen
Afdeling: Bouwkunde

In samenwerking met:

Iv-industrie Te Arnhem



Voorwoord

Voor u ligt een afstudeerverslag welke het resultaat is van een onderzoek naar het construeren van een tweede draagweg in de praktijk, uitgevoerd bij IV-industrie te Arnhem. Met dit verslag zullen wij de studie Bouwkunde aan de Hogeschool van Arnhem en Nijmegen afronden.

Nadat we geïnformeerd hebben naar de mogelijkheid om het afstudeeronderzoek te doen over instorting van gebouwen, heeft Thomas Beuker, een docent van de opleiding ons gewezen op de mogelijkheid om een tweede draagweg te berekenen. Dit bleek niet alleen betrekking te hebben op instorting, maar het heeft ook een praktische invalshoek. Het eindresultaat is dat we erg veel geleerd hebben over het rekening houden met calamiteiten bij het constructief ontwerpen. We hebben het gevoel dat we veel geleerd hebben en nu een goede indruk hebben van wat er allemaal bij het onderwerp komt kijken.

Gelukkig bleek IV-industrie geïnteresseerd te zijn in ons afstudeeronderzoek en boden ze ons een prettige vaste werkplek op hun vestiging te Arnhem. Daarvoor willen we hierbij de heer André Rijkeboer bedanken. Verder willen we met name Peter de Blik, onze begeleider van IV-industrie, bedanken voor zijn tips en inzet.

Ook willen we vanaf deze plaats Kees van der Zijden, een van onze begeleiders enorm bedanken voor zijn inzet. De theoretische diepgang van het onderzoek zou zonder zijn hulp nooit het niveau kunnen hebben gehaald als het geworden is. Steeds weer, vaak ook in de avonden, was hij bereid ons verder te helpen zodra we vastliepen in onze uitwerkingen. Ook hebben we een groot deel van de opzet van het project te danken aan hem. Verder willen we de afstudeerbegeleider Jaap Rikken bedanken voor zijn ideeën en tips; zo was hij het die op het idee kwam om buitenlandse regelgeving te bestuderen.

Tot slot willen we onze vriend(inn)en en familie bedanken. Dankzij hun steun werd het ook makkelijker om het project af te ronden.

Berjo Rijnders en Eva Geurtsen
Mei 2011



Samenvatting

Een tweede draagweg is een constructieve ontwerpmaatregel die instorting voorkomt in geval van een calamiteit. Het plaatsvinden van terroristische aanslagen de laatste decennia heeft de relevantie van het onderwerp sterk verhoogd. Tevens bevat de regelgeving in de Eurocode enkele relevante artikelen die een goede inventarisatie van het onderwerp nodig maakt.

Dit afstudeerverslag heeft betrekking op de tweede draagweg in gebouwen. Het verslag is opgesteld voor het afstudeerproject *tweede draagweg in de praktijk* aan de Hogeschool van Arnhem en Nijmegen. Meer specifiek wordt er een onderzoek verricht naar de beste manier om een tweede draagweg in een gewapende betonconstructie te ontwerpen. Dit onderzoek gaat in op de vraag:

Hoe kan bepaald worden welk ontwerp van een tweede draagweg in de praktijk het beste is?

Het voornaamste doel van dit onderzoek is het verkrijgen van meer inzicht in de theoretische en praktische achtergronden van constructie in het algemeen en het ontwerpen van een tweede draagweg in het bijzonder. Daarnaast is het doel van dit verslag een naslagwerk te maken dat dient als eerste opzet en handreiking voor verder onderzoek naar het ontwerpen van een tweede draagweg.

Naast een algemene voorstudie en literatuurstudie naar maatregelen tegen instorting, omvat de kern van dit onderzoek een analyse van verschillende modellen die kunnen dienen als ontwerp voor een tweede draagweg. Deze analyse werd losgelaten op een eenvoudige gewapend betonconstructie van twee verdiepingen. Hierin konden de belangrijkste aspecten van een tweede draagweg bestudeerd worden. In een voorstudie werden verscheidene relevante artikelen, regelgeving en theoretische achtergronden verzameld en bestudeerd. Vervolgens werden drie verschillende calamiteitsituaties gedefinieerd en is geanalyseerd wat de beste wapeningsmethode is om daarbij een tweede draagweg te creëren.

Tijdens de analyse van de eerste calamiteitsituatie kwam naar voren dat goede modellen van de constructie niet eenvoudig te vangen zijn met een handberekening. Uit bestudering van de constructie met het computerprogramma Scia Engineer bleek dat de calamiteit zelf het gedrag van de constructie beïnvloedt zodat een handberekening al gauw te complex is. In een poging de resultaten te vergelijken met het programma Scia Engineer kwamen ook andere moeilijkheden aan het licht. Herverdeling van de belastingen speelde daarbij een bemoeilijkende rol.

Echter, door hier verdere studie naar te verrichten is het mogelijk geweest om met statisch lineair rekenen in Scia Engineer te laten zien dat het nodig is meerdere modellen samen te laten werken bij het efficiënt ontwerpen van een tweede draagweg. Daarbij is gebleken dat voor een calamiteitsituatie, benutting van de reservecapaciteit van het standaard wapeningsstaal eerst dient te worden meegenomen, voordat extra bijlegwapening wordt ontworpen.



Summary

An alternative load path is a structural design provision aimed at preventing progressive collapse in case of emergency. Occurrence of terrorist attacks in the last decades has enforced the relevance of the subject. Also, the Eurocode structural regulations have raised the need to investigate the subject.

This study applies to alternative load paths in buildings. This paper is written as a graduation paper for the project *alternative load path in practice* at HAN University. More specifically, research is being done at the best method for designing an alternative load path in reinforced concrete structures. This study intends to answer the following question:

How to determine which design for alternative load paths is best?

The main aim of this study is to provide insight into theoretical and practical backgrounds of structural engineering in general and in designing alternative load paths specifically. Also this study is aimed at creating a reference report that offers a first step for further investigations in designing alternative load paths.

Besides a general preliminary survey and secondary research for measures for reducing progressive collapse, the heart of this paper is an analysis of various design models that may serve as alternative load paths. The subject of the analysis was an uncomplicated two floor reinforced concrete structure. This allowed the most important aspects of alternative load paths being studied. In the preliminary survey various relevant articles, regulations and theoretical backgrounds were collected and studied. Subsequently, three emergency situations were defined and analysis of the best method for designing an alternative load path with concrete reinforcement followed.

During the analysis of the first emergency situation it appeared that it is difficult to manually model the design's structural behaviour correctly. From studying the structure with the software of Scia Engineer, it appeared that the emergency influences the structural behaviour such that calculations by hand quickly become too complex. Attempts to compare the data with the data of Scia Engineer gave rise to more difficulties.

However, by investigating further it proved possible with linear static calculations in Scia Engineer to show that it is necessary to mix different models when designing the most efficient alternative load path. It was shown that the spare capacity in the standard concrete reinforcement should be taken into account before designing extra steel reinforcement.



Opgave van bijlagen

De bijlagen die hieronder zijn weergegeven, zijn opgenomen in het aparte bijlagendocument.

BIJLAGE A: LITERATUUR- EN VOORSTUDIE

BIJLAGE B: BEREKENINGEN BASISMODEL

BIJLAGE C: BEREKENINGEN SITUATIE 1: WEGVALLEN HOEKKOLOM

BIJLAGE D: BEREKENINGEN SITUATIE 2: WEGVALLEN MIDDENKOLOM

BIJLAGE E: BEREKENINGEN SITUATIE 3: WEGVALLEN MIDDENKOLOM ONDER WAND

BIJLAGE F: LEERMOMENTEN EN REFLECTIES

BIJLAGE G: PLAN VAN AANPAK EN PLANNING

BIJLAGE H: ALGEMENE PROJECTBIJLAGEN



Inhoudsopgave

VOORWOORD	I
SAMENVATTING	II
SUMMARY	III
OPGAVE VAN BIJLAGEN	IV
INHOUDSOPGAVE	V
1. INLEIDING	1
1.1 INLEIDING	1
1.2 LEESWIJZER	2
2. AFSTUDEERONDERZOEK	3
2.1 BESCHRIJVING AFSTUDEERONDERZOEK	3
2.2 DOELEN EN ONDERZOEKSVRAGEN	6
3. PROCES LITERATUUR- EN VOORSTUDIE	7
3.1 INFORMATIE VERZAMELEN EN INVENTARISEREN	7
3.2 THEORIE BESTUDEREN	7
3.3 LITERATUURSTUDIE	8
4. CONCLUSIES LITERATUUR- EN VOORSTUDIE	9
4.1 CONCLUSIE VOORSTUDIE	9
4.2 CONCLUSIE LITERATUURSTUDIE	11
5. UITGANGSPUNTEN HOOFDONDERZOEK	13
5.1 UITGANGSPUNTEN BASISMODEL	13
5.2 SITUATIES 1, 2 EN 3	15
5.3 HANDBEREKENING BASISMODEL	15
5.3.1 PROJECTGEGEVENS	15
5.3.2 VLOERBEREKENING	16
5.3.3 BALKBEREKENING	17
5.3.4 KOLOMBEREKENING	18
5.4 SCIA ENGINEER BEREKENING BASISMODEL	19
6. HOOFDONDERZOEK	21
6.1 SITUATIE 1: HOEKKOLOM VALT WEG	21
6.1.1 MODEL 1: DE BALK NEEMT HET EXTRA MOMENT OP	22
6.1.2 MODEL 2: DE KOLOMSTROOK NEEMT HET EXTRA MOMENT OP	23
6.1.3 MODEL 3: DE VLOER NEEMT HET EXTRA MOMENT OP	23
6.1.4 TOTAALMODEL:DE GEHELE CONSTRUCTIE NEEMT HET EXTRA MOMENT OP	26
6.2 SITUATIE 2: MIDDENKOLOM VALT WEG	27
6.3 SITUATIE 3: MIDDENKOLOM VALT WEG, WANDEN OP 1 ^E VERDIEPING	27



7.	RESULTAATANALYSE EN CONCLUSIES	28
7.1	ANALYSE VAN DE RESULTATEN	28
7.2	HOOFDCONCLUSIE	30
7.3	(SUB)CONCLUSIES	31
8.	LEERMOMENTEN EN AANBEVELINGEN	33
9.	NABESCHOUWING	35
LITERATUURLIJST		37
GERAADPLEEGDE WEBSITES		38



1. Inleiding

1.1. Inleiding

Er zijn veel voorbeelden te noemen van gebouwen die de laatste jaren zijn ingestort. Veruit het bekendste voorbeeld betreft de instorting die volgde op de aanslag van de WTC torens in New York in 2001. Dit voorbeeld laat zien dat er allerlei onvoorziene calamiteiten kunnen plaatsvinden. Terroristische aanslagen hebben de laatste decennia er toe geleid dat maatregelen tegen instorting hoger op de agenda zijn komen te staan. Ook verdient het ontwerpen van een tweede draagweg ten gevolge van de invoering van de Eurocode regelgeving steeds meer de aandacht van constructeurs. In de Eurocode staan veel richtlijnen voor het aanbrengen van trekbanden in betonconstructies. In de praktijk wordt echter vaak niet of slecht beschouwd in hoeverre deze maatregel werkt. Bij gebouwen met een hoge veiligheidsklasse komt het voor dat een constructeur een uitgebreide analyse moet maken van een tweede draagweg. Een dergelijke analyse benodigd veel kennis van het uiterste gedrag van een constructie. Voor veel constructeurs is deze materie vrij lastig.

Het is daarom ook weinig verrassend dat afstudeerders van de HTS met veel van deze materie tijdens de opleiding nog geen kennis hebben gemaakt. De noodzakelijke achtergrondkennis heeft betrekking op dat deel van het vakgebied dat zich toelegt op toepassingen bij extreme, en dus uitzonderlijke, omstandigheden. Maar juist dit laatste feit is aanleiding geweest om het afstudeerverslag over dat onderzoek te doen. Want wat geeft een student meer inzicht en gevoel voor constructies dan een theoretische verdieping in de extremen waaraan constructies worden blootgesteld?

De doelstelling van dit afstudeerproject was in de eerste plaats het verrichten van een onderzoek waarvan de resultaten als 'tool' kunnen dienen bij het ontwerpen van een tweede draagweg. Maar vanwege het feit dat veel van de achtergronden veel nieuwe materie betreft, was deze doelstelling maar beperkt haalbaar. Een toepasselijkere doelstelling is daarom: het maken van een naslagwerk of eerste opzet/handreiking voor verder onderzoek naar ontwerp van een tweede draagweg. Om deze doelstelling te halen is een onderzoeksopzet met resultaten nodig. Bij de opzet van een dergelijk onderzoek is ook de opzet van een onderzoeksvraag noodzakelijk. De hoofdvraag die dit onderzoek probeert te beantwoorden is daarom de volgende: Hoe kan bepaald worden welk ontwerp voor een tweede draagweg in de praktijk het beste is?

Het antwoord op deze vraag kan noodzakelijke informatie verschaffen voor een vervolgonderzoek. Immers, pas zodra je weet hoe iets bepaald kan worden, is het ook mogelijk onderzoek te doen. In dit afstudeeronderzoek is gekozen voor de beschouwing van een eenvoudige constructie van gewapend beton. In een vervolgonderzoek zou bijvoorbeeld verder in kunnen worden gegaan op het efficiënt ontwerpen van tweede draagweg bij verschillende bouwtypen en/of bij verschillende soorten constructies. Ook is het denkbaar dat verder onderzoek kan dienen als een bruikbare tool voor het ontwerpen van een tweede draagweg.

Een andere belangrijke doelstelling van dit afstudeerproject is het inzicht krijgen in de achtergronden bij het ontwerpen van een tweede draagweg. Er dienen dus leermomenten te ontstaan. Deze doelstelling kan gehaald worden door het opdoen van ervaringen. Er zijn vele ervaringen in dit project waaraan leermomenten zijn verbonden. Een dergelijke ervaring is een verdieping in de regelgeving. Het lezen van en rekenen met eurocode artikelen is een ervaring die zeer bruikbaar is in de praktijk. Maar ook het bestuderen van de buitenlandse richtlijnen biedt veel inzicht in de



mogelijke verschillen en overeenkomsten en in de manier waarop achtergronden en ideeën naar voren kunnen komen in daadwerkelijke richtlijnen. Een andere ervaring bij het lezen van literatuur is het kennismaken met verschillende typen mechanismen die een rol kunnen spelen bij het onderwerp. Dit blijkt onontbeerlijke kennis te zijn, niet alleen bij het ontwerpen van een tweede draagweg, maar ook in algemene zin voor het constructief inzicht.

De ervaring van het onderzoek zelf biedt naast de mogelijkheid geleerde rekenregels, betreffende beton en mechanica, toe te passen ook vooral inzicht in de wijze waarop de belastingafdracht in een constructie verloopt. Het vertrouwd raken met het gedrag van een constructie biedt veel nuttige leermomenten.

Een erg belangrijke ervaring is ook het vertrouwd raken met het computerprogramma Scia Engineer. In Nederland wordt dit programma veel gebruikt. De ervaring die hiermee opgebouwd wordt, draagt bij aan het snel kunnen controleren van handberekeningen en levert op die manier een positieve bijdrage aan het inzicht in constructies.

1.2. Leeswijzer

Dit verslag kent eenzelfde volgorde als die waarin het onderzoek heeft plaatsgevonden. Dit houdt in dat eerst de literatuur- en voorstudie behandeld wordt; vervolgens wordt het hoofdonderzoek behandeld; en daarachter volgen de resultaten en conclusies. Steeds is getracht zoveel mogelijk te verwijzen naar de relevante bijlagen. De bijlagen zijn gebundeld in een apart document. Ook de bijlagen zijn in dezelfde volgorde aangehouden als die waarin het onderzoek heeft plaatsgevonden.

De literatuur- en voorstudies zijn te vinden in bijlage A. In dit hoofdonderzoek is hiervan alleen het proces en een conclusie gevat.

Het hoofdonderzoek is opgezet in deze volgorde: eerst wordt het ontwerp van het basismodel laten zien, zie hoofdstuk 5. Vervolgens worden in hoofdstuk 6 de analyse van de verschillende calamiteitsituaties behandeld; steeds eerst de handberekening(en) met daarop volgend de berekening met Scia Engineer.

De indeling van de bijlagen kent dezelfde volgorde als het hoofdverslag. Ter verduidelijking van de specifieke calamiteit is in de bijlage bovenaan de pagina waar mogelijk een afbeelding te vinden van de constructie met een pijl die wijst in de richting van de calamiteit. In bijlagen B tot en met E zijn alle relevante uitgewerkte berekeningen vooraan geplaatst. Bij berekeningen met Scia Engineer zijn uitdraaien van de berekening afgedrukt en in de betreffende bijlage geplaatst.



2. Afstudeeronderzoek

2.1. Beschrijving afstudeeronderzoek

Algemeen

Het afstudeeronderzoek kent een aantal achtereenvolgende stappen. Deze stappen zullen in dit hoofdstuk worden toegelicht. Deze stappen zijn achtereenvolgens:

1. Informatie verzamelen
2. Literatuurstudie
3. Theorie bestuderen
4. Onderzoek opzetten
5. Onderzoek uitvoeren
6. Resultaten verwerken

In het plan van aanpak, die opgenomen is in bijlage G.1, zijn de fasen I tot en met III opgezet. In fase I wordt, naast het opzetten van het plan van aanpak, informatie verzameld. In fase II wordt achtereenvolgens de literatuurstudie gedaan, de theorie bestudeerd en wordt het onderzoek gedaan. In fase III worden de resultaten uitgewerkt en samengevoegd. Tevens is in het PVA de planning weergegeven volgens welke het afstudeeronderzoek is getracht te volgen. Dit PVA is te vinden in de bijlage. Hierin is ook te vinden dat er een casus zou worden uitgewerkt. In een later stadium is besloten hier van af te zien in verband met de tijd die nodig was om het hoofdonderzoek af te wikkelen.

Informatie verzamelen

De eerste stap die genomen is, is het verzamelen van informatie. Op die manier kan er een beeld gevormd worden van de huidige problematiek rondom het onderwerp 'tweede draagweg' en de mechanismen die daarbij toegepast kunnen worden. Er is gebruik gemaakt van de volgende bronnen:

1. Praktijkvoorbeelden

Dit houden berekeningen en tekeningen van toepassingen van een tweede draagweg in. Deze zijn gezocht bij docenten of bij constructeurs van bijvoorbeeld IV-Industrie.

2. Gesprekken

Door contact op te nemen en gesprekken te voeren met mensen die zich bezighouden met tweede draagweg kon het onderzoek in de juiste richting gestuurd worden. Contact werd opgenomen met andere studenten met soortgelijke afstudeeronderwerpen, auteurs van documenten over tweede draagweg, bouwbeurs, constructeurs, et cetera. In bijlage H.2 is deze correspondentie te vinden.

3. Boeken en rapporten

In de bibliotheken van IV-Industrie, de HAN en de TU Delft is gezocht naar relevante literatuur.

4. Artikelen en regelgeving

Door op internet en in bibliotheken te zoeken naar relevante artikelen over het onderwerp en regelgeving, kunnen de meest actuele ontwikkelingen op het gebied van tweede draagweg in kaart gebracht worden. Deze artikelen werden kort samengevat en ordelijk in een overzicht geplaatst zodat op een later moment makkelijk het onderwerp terug kan worden gevonden. Een overzicht hiervan is te vinden in bijlage A.6.

Literatuurstudie

Het onderwerp van de literatuurstudie, is tweeledig. Eerst is de Nederlandse regelgeving geïnventariseerd en samengevat. Daarbij werd een vergelijking gemaakt tussen de oude en nieuwe



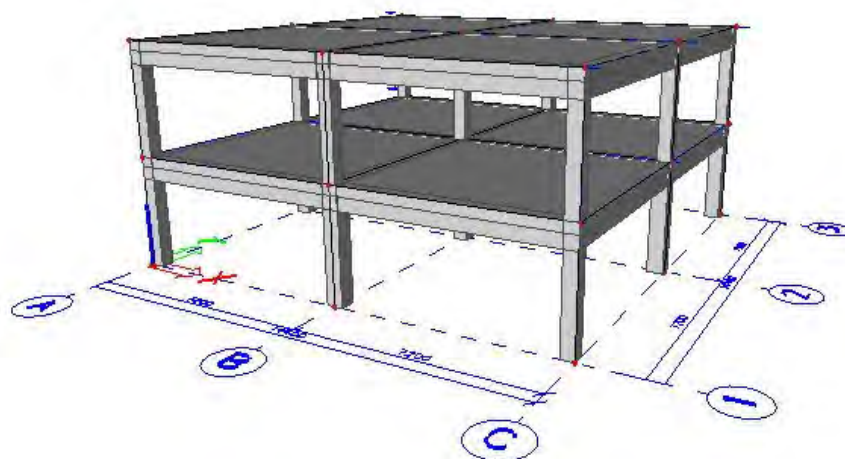
regelgeving (respectievelijk NEN en NEN-EN). Daarna is een verslag gemaakt van de aanpak van tweede draagweg in de Verenigde Staten en Groot Brittannië. De globale informatie hierover is al verzameld in fase I. Tijdens deze stap is de informatie verder uitgediept en verwerkt tot een verslag.

Theorie bestuderen

De praktijkvoorbeelden, boeken en andere informatie die in een vorige fase al in kaart gebracht waren, werden tijdens deze stap verder bestudeerd. Er is in de beschikbare literatuur uit de vorige fase gezocht naar verschillende mechanismen of andere theoretische principes bestudeerd die een rol spelen in het project. Vervolgens werden die bestudeerd zodat er berekeningen mee gemaakt konden worden. Hierbij moet gedacht worden aan bijvoorbeeld M-Kappa diagrammen en vloeilijnentheorie. In bijlagen A.3 t/m A.5 zijn hiervan enkele uitwerkingen opgenomen.

Onderzoek opzetten

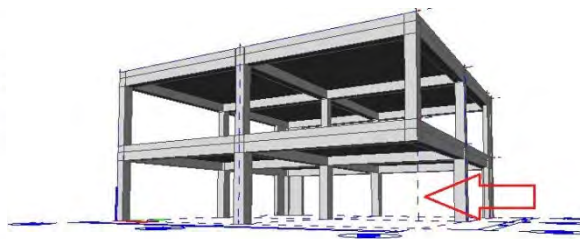
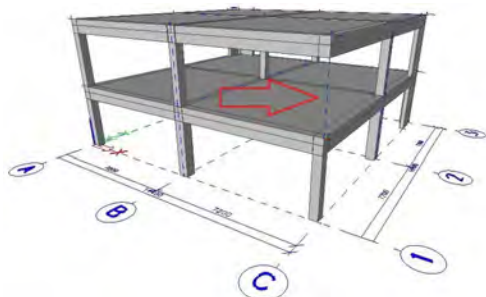
Om aan een praktische situatie te kunnen rekenen, is een eenvoudig, gewapend betonnen, in het werk gestort, gebouw gekozen, in het vervolg van dit verslag 'basismodel' genoemd. Dit gebouw werd vervolgens ontworpen met de ontwerpregels uit de Eurocode (NEN-EN) en VBC (NEN). Tevens is het ontwerp in het computerprogramma Scia Engineer opgezet.



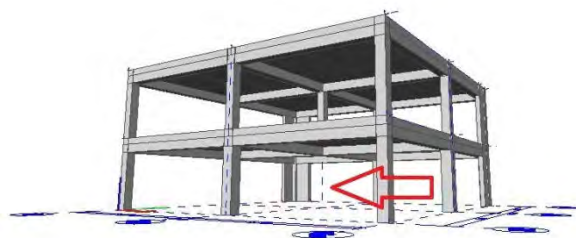
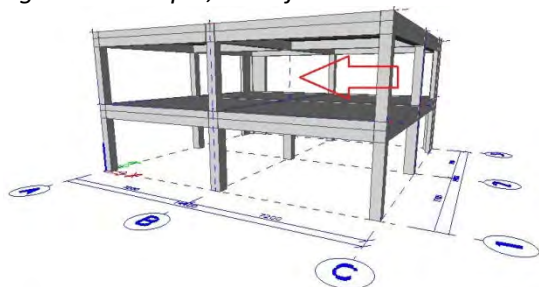
Figuur 2.1: Ontwerp van het gebouw dat dient als onderzoeksobject.

Onderzoek uitvoeren

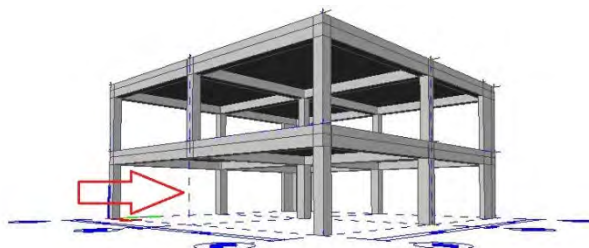
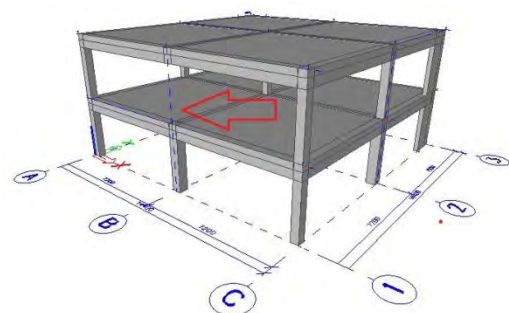
Vervolgens is gekeken naar verschillende calamiteitsituaties waarbij steeds een andere kolom verwijderd wordt; te beginnen met een hoekkolom op de bovenverdieping, in dit verslag verder 'situatie 1' genoemd. Er is getracht voor een dergelijke situatie het gedrag van de constructie te vangen in verschillende modellen, die vergeleken kunnen worden. Op die manier kan inzicht worden verkregen in verschillende oplossingen en in de toepasbaarheid ervan. De verschillen tussen de modellen die daarbij opgesteld worden, bestaan uit het verschillend plaatsten van extra wapeningsstaven in het ontwerp. De modellen werden met de hand en met behulp van Excel en Technosoft doorgerekend. Tevens werden de resultaten daarvan met het constructieve ontwerpprogramma Scia Engineer gecontroleerd. Dat is gedaan door de verschillende situaties daarin te modelleren en te analyseren.



Figuur 2.2: Stap 1; verwijderde hoekkolom boven. Figuur 2.3: Stap 2; verwijderde hoekkolom onder.



Figuur 2.4: Stap 3; verwijderde middenkolom. Figuur 2.5: Stap 4; verwijderde middenkolom onder.



Figuur 2.6: Stap 5; verwijderde randkolom boven Figuur 2.7: Stap 6; verwijderde randkolom onder.

Vervolgens bestaat de mogelijkheid ook om kolommen te laten wegvallen in een constructie waarbij de bovenverdieping een wandenstructuur heeft. Deze situatie is uiteraard ook veel voorkomend in de praktijk.

Resultaten verwerken

Uiteindelijk kan dit onderzoek met de bijbehorende resultaten dienen als naslagwerk of een eerste opzet/handreiking voor verder onderzoek naar het ontwerpen van een tweede draagweg. Daaruit zou een tool gemaakt kunnen worden die fungeert als instrument voor het veilig ontwerpen van een bouwwerk.



2.2 Doelen en onderzoeksvragen

Voor veel constructeurs is het ontwerpen van een tweede draagweg nog onbekend terrein. Met deze afstudeeropdracht is het de bedoeling om meer kennis op te doen over het onderwerp 'tweede draagweg' en een goed onderzoek te doen, waardoor het ontwerpen van een tweede draagweg eenvoudiger wordt.

De doelen van deze afstudeeropdracht zijn:

- Inzicht krijgen in de theoretische en praktische achtergronden van constructies in het algemeen en het ontwerpen van een tweede draagweg in het bijzonder.
- Een naslagwerk maken dat dient als eerste opzet en handreiking voor verder onderzoek naar het ontwerpen van een tweede draagweg.

Om het project af te bakenen wordt een hoofdvraag met een aantal subvragen gesteld. Deze vragen worden als leidraad gebruikt bij het maken van het project. Tijdens het onderzoek wordt getracht de subvragen te beantwoorden. Aan het einde van dit onderzoek moet de hoofdvraag beantwoord kunnen worden.

Aan de hand van het onderzoek en de subvragen moet de volgende hoofdvraag beantwoord worden:

Hoe kan bepaald worden welk ontwerp voor een tweede draagweg in de praktijk het beste is?

Zoals eerder genoemd zullen eerst de subvragen beantwoord moeten worden, om uiteindelijk de hoofdvraag te kunnen beantwoorden. Hieronder zijn de subvragen geformuleerd:

Tijdens de voorstudie zal eerst getracht worden de volgende subvragen te beantwoorden:

- Wat wordt in de Nederlandse regelgeving gezegd over tweede draagweg?
- Welke onderwerpen zijn van belang in de problematiek?
- Hoe wordt in de Verenigde Staten en het Verenigd Koninkrijk omgegaan met problematiek rondom de tweede draagweg?
- Welke hulpmiddelen kunnen gebruikt worden om eenvoudiger en veiliger te ontwerpen?

Tijdens het hoofdonderzoek wordt vervolgens dieper ingegaan op de volgende subvragen:

- Welke mechanismen treden er op in een tweede draagwegconstructie?
- Zijn oplossingen voor een tweede draagweg goed te vatten met modellen?
- Welke invloed heeft een calamiteit op de belastingafdracht van een constructie?
- Welke invloed heeft het M-kappa diagram op de bepaling van de uiteindelijke zakking?
- Wat zijn de verschillen tussen een handberekening en een berekening met Scia Engineer en hoe zijn deze te verklaren?
- Hoe is de tweede draagweg in een praktische situatie het efficiëntst te bepalen?



3. Proces literatuur- en voorstudie

3.1. Informatie verzamelen en inventariseren

Het was vrij gemakkelijk alle informatie die noodzakelijk was, te vinden. In eerste instantie was het nuttig om een grote hoeveelheid documentatie te verzamelen uit de boekenkasten van IV-Industrie en uit de bibliotheken van de Hogeschool van Arnhem en Nijmegen en van de TU Delft. Daarnaast was het erg nuttig en leerzaam om in contact te komen met een student van de TU Delft die in een soortgelijk onderzoek afstudeert bij bruggen. Deze student werd geïnterviewd en hij heeft een grote hoeveelheid Engelstalige documenten geleverd, waaronder veel artikelen en regelgevingen.

In deze beginfase stond nog niet duidelijk voor ogen hoe we het afstudeeronderzoek precies zouden opzetten. Daarom zijn al deze documenten, boeken en artikelen overzichtelijk op een rij gezet en kort samengevat. Daarbij werd steeds per document geprobeerd interessante onderwerpen die nuttig kunnen zijn voor ons onderzoek er uit te halen en te verzamelen. In de bijlage A.6 is het overzicht van deze documenten en de samenvattingen te vinden. Op deze manier is het mogelijk geweest inzicht te krijgen in de problematiek. Het bestuderen van deze artikelen en andere documenten heeft echter enkele dagen meer tijd gekost dan gepland.

Tevens hebben we een gesprek gehad met een auteur van het Stufib rapport over maatregelen tegen instorting. Verder zijn we op de bouwbeurs geweest om ideeën op te doen. Ook hebben er gesprekken plaatsgevonden met constructeurs van IV-industrie en docenten van de Hogeschool van Arnhem en Nijmegen. Verder is geïnformeerd bij IV-industrie en onze afstudeerdocent naar voorbeeldprojecten waarbij tweede draagweg een rol speelt. Enkele zijn bestudeerd.

Gedurende deze eerste periode is ook geprobeerd overzichtelijk te maken welke mechanismen en toepassingen een rol spelen bij tweede draagweg en instorting. Daarbij werd geprobeerd steeds de relevante artikelen of documenten die voor het betreffende onderwerp van toepassing waren op een rij te zetten. Dit is in een overzicht gezet dat tevens is te vinden in bijlage A.6.

3.2. Theorie bestuderen

Na het verzamelen en samenvatten van alle documenten is begonnen met het bestuderen van enkele relevante theoretische onderwerpen. Deze fase heeft geleid tot een uitloop van het project van enkele weken. Gedacht was dat deze theoretische achtergronden noodzakelijk waren voor een goede opzet van het hoofdonderzoek en daarom werd besloten veel tijd er in te steken. Een overzicht van de initiële en de uiteindelijke planning is te vinden in bijlage G.2.

De onderwerpen waar in verdiept is, zijn de volgende:

Een van de voorbeelden betrof een project waarbij de stabiliteit van een gebouw met schijfwerking verzorgd werd en voor verschillende calamiteiten is uitgerekend. Deze hebben we zelf ook nagerekend. Achtergronden van een dergelijke berekening zijn te vinden in bijlage A.5.



We hebben via studiemateriaal van de afstudeerdocent de mogelijkheid gehad om vloeilijentheorie te bestuderen. Daarbij hebben we ook zelf zo veel mogelijk berekeningen gemaakt. Aantekeningen hiervan zijn te vinden in bijlage A.4.

Ook de theorie achter M-Kappa diagrammen hebben we bestudeerd en geoefend. Deze theorie hebben we voornamelijk uit studieboeken gehaald. We hebben Excelbestanden met M-kappa berekeningen van IV-Industrie bekeken. Vervolgens hebben we hiervoor ook zelf een Excelbestand opgesteld om te kunnen gebruiken voor het hoofdonderzoek. Deze stap heeft enige tijd gekost maar heeft wel noodzakelijke inzichten verschaft in betonconstructies. Enkele achtergronden hierover zijn te vinden in bijlage A.3.

3.3. Literatuurstudie

De literatuurstudie (over richtlijnen in de VS en GB) vond gelijktijdig plaats met voorgenoemde theoretische verdieping. Deze stap heeft enkele weken geduurd. In bijlage A.2 is deze literatuurstudie opgenomen.

Eerst is uit de voorgenoemde verzameling een aantal documenten en artikelen gekozen die relevant zijn (betrekking hebben op de richtlijnen in de VS en GB). Deze documenten werden extra goed doorgelezen. Geprobeerd is de belangrijkste richtlijnen te verzamelen en de meest relevante zaken hiervan samen te vatten in de literatuurstudie. Doordat het onderwerp nogal veelzijdig is, hebben we besloten voornamelijk de meest algemene zaken te benoemen. Het belangrijkste was voor onszelf om globaal enig inzicht te krijgen in welke regelgeving er geldt in de genoemde landen. De eerste taak was dan ook het voor ogen krijgen welke richtlijnen het meest relevant zijn. Vervolgens werd inhoudelijk gekeken naar de richtlijnen, strategieën en maatregelen die genoemd staan in de documenten.

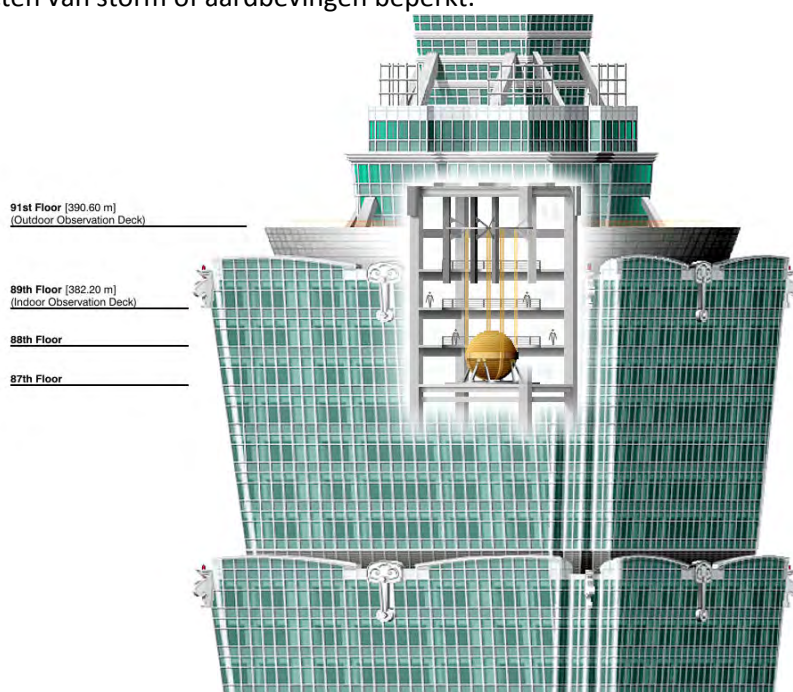
De inventarisatie van de Nederlandse regelgeving is meer een overzicht geworden van de verschillen in ontwerpstrategie tussen de regelgeving uit de Eurocode (NEN-EN) en de verouderde NEN, betreffende tweede draagweg. Uiteindelijk is dit ook opgenomen als onderdeel van de literatuurstudie. Dit onderdeel was al in een eerdere fase van het project (fase I) uitgevoerd; besloten is echter om dit ook in de bijlage (A.1) toe te voegen in de vorm van een literatuurstudie.

4. Conclusies literatuur- en voorstudie

4.1. Conclusie voorstudie

Informatie verzamelen

Er zijn verschillende manieren waarop omgegaan kan worden met extreme belastingsituaties. Een van de manieren is om ervoor te zorgen dat een bouwwerk iedere relevante belasting kan opnemen. Wordt deze aanpak gebruikt, dan is het noodzakelijk een uitgebreide risicoanalyse uit te voeren naar de mogelijkheden van deze belastingen. Er zijn daarbij verschillende ontwerpmogelijkheden. Een simpele mogelijkheid is om elementen die extra gevaar lopen sleutelementen te benoemen en die te dimensioneren op specifieke calamiteitbelastingen. Een complexere oplossing is bijvoorbeeld in wolkenkrabbers de toepassing van een 'tuned mass damper', een groot hangend gewicht dat de dynamische effecten van storm of aardbevingen beperkt.



Figuur 4.1: Tuned Mass Damper in Taipei 101, Taiwan.

Een algemene richtlijn is om de indeling van de constructie zo te maken dat het ontwerp een zekere robuustheid heeft. In het kader hiervan is een ontwikkeling van belang, op de TU Delft, van een tool waarmee een zekere analyse van de constructie meegenomen kan worden in een vroege ontwerpfase. Het betreft hier een risicoanalyse waarbij een computermodel van de constructie iedere bezwijkmogelijkheid doorrekent. Op die manier kunnen van verschillende ontwerpen de mate van weerstand tegen voortschrijdende instorting tegen elkaar afgewogen worden. Deze ontwikkeling bevindt zich echter nog in een vroeg stadium.

Voor het ontwerpen van een tweede draagweg, wordt altijd aangenomen dat een dragend element al bezweken is door een calamiteit. Hierbij wordt een zekere redundantie bewerkstelligd in de constructie. Hiervoor kan veel theoretische kennis benodigd zijn.



Er zijn verschillende mechanismen te onderscheiden, die toegepast kunnen worden in het ontwerp van een tweede draagweg:

1. Schijfwerking. Door de boogwerking in een wand kan bij bezwijken van een onderliggend element een wand dienen als balk die de overspanning draagt.
2. Raamwerk dat momenten kan opnemen (vierendeelconstructie). Een constructie kan ontworpen worden met een raamwerk dat momenten op kan nemen ter plaatse van de verbindingen. Dit wordt vaak toegepast bij ontwerp tegen aardbevingen. In de Engelstalige literatuur wordt een onderscheid gemaakt tussen verschillende niveaus waarin een vakwerkconstructie in staat is de momenten op te nemen; zo zijn er 'ordinary moment frames' (OMF), 'intermediate moment frames' (IMF), and 'special moment frames' (SMF).
3. Raamwerk dat geen moment kan opnemen in de scharnierende verbindingen.
4. Kettinglijnwerking. Bij het ontwerpen kan rekening worden gehouden met het ontstaan van kettinglijn. Dit houdt in dat een constructief element, bijvoorbeeld een vloer, na bezwijken van een ondersteuning, de mogelijkheid heeft om te gaan hangen in de vorm van een kettinglijn. Deze mogelijkheid hangt echter samen met andere mechanismen in de vloer, zoals membraanwerking, en benodigt daarom veel nauwkeurige studie van de constructie.

Bij de berekening van het ontwerp van voorgenoemde mechanismen zijn er verschillende analysemogelijkheden, met verschillende complexiteit.

1. Statisch lineair, hierbij worden dynamische effecten van de bezwijking niet geanalyseerd, en wordt uitgegaan van lineair materiaalgedrag.
2. Statisch niet-lineair, hierbij worden dynamische effecten van de bezwijking ook niet geanalyseerd, maar wordt uitgegaan van het meer nauwkeurige niet-lineair materiaalgedrag.
3. Dynamisch niet-lineair, hierbij worden dynamische effecten van de bezwijking wel geanalyseerd en wordt ook uitgegaan van niet-lineair materiaalgedrag.

Volgens de richtlijnen kan vaak de statisch lineaire analyse worden toegepast, mits de belastingen worden vergroot met een bepaalde factor die de dynamische en niet-lineaire effecten vertegenwoordigt.

Voor het creëren van voorgenoemde mechanismen zijn er natuurlijk vele specifieke toepassingen mogelijk per materiaal. In staal kan dit bijvoorbeeld de toepassing zijn van versterkte schoren in vakwerken of het voorkomen van een domino-instorting door het toepassen van verbindingen die hun weerstand behouden als ze vervormen; of in metselwerk kan bijvoorbeeld wapening worden aangebracht. Tevens zijn er materiaalkundige mogelijkheden die kunnen helpen bij het ontwerpen van een tweede draagweg. Het toepassen van innovatieve materialen met andere constructieve eigenschappen kunnen gunstige effecten hebben.

Naast tweede draagweg zijn er ook andere mogelijkheden die dienen om de voortgang van een instorting te beperken. Voorbeelden zijn het ontwerpen van verstevigde verdiepingen in hoge gebouwen die andere instortende verdiepingen kunnen opvangen ('strong floors'). Een andere mogelijkheid die bijvoorbeeld bij bruggen wordt toegepast is segmentering; hierbij worden constructiedelen zo ontworpen dat ze bij instorting geen effect hebben op naastliggende delen.

Bestuderen theorie en voorbeelden

M-kappa diagrammen bieden de mogelijkheid om het gedrag van een constructie meer nauwkeurig te berekenen. Als bijvoorbeeld de zakking van een balk bepaald moet worden, dan is de stijfheid van die balk in het midden anders dan aan de uiteinden. Om een zakking nauwkeurig te bepalen is het daarom noodzakelijk de stijfheid in kaart te brengen voor verschillende delen van de balk. Om dat te



kunnen doen is het noodzakelijk te bepalen hoe groot het scheurmoment, vloeimoment, stuikmoment en bezwijkmoment zijn. Op die manier kan de balk ingedeeld worden in stukken waarin die verschillende momenten nog niet hebben opgetreden. Ieder stuk heeft dan een verschillende stijfheid. Dit is noodzakelijk om een juiste zakking te kunnen bepalen. In bijlage A.3 wordt hier verder op in gegaan.

Een andere relevante theorie is de vloeilijentheorie. Om het bezwijkgedrag van een constructie goed in kaart te kunnen brengen moet gekeken worden waar breuklijnen ontstaan in de vloervelden. Dit kan gedaan worden met de vloeilijentheorie. In deze theorie wordt met onder andere arbeidsvergelijkingen bewezen dat er een bepaald breuklijnenpatroon ontstaat in bijvoorbeeld een vloer. Kennis over deze patronen kunnen noodzakelijk zijn bij het ontwerpen van een tweede draagweg. In bijlage A.4 zijn enkele uitwerkingen opgenomen van berekeningen met de vloeilijentheorie. Hierin wordt o.a. aangetoond wat de vorm is van de vloeilijnen bij calamiteiten in het onderzoeksmodel. Dat kan nuttig blijken bij het ontwerpen van een tweede draagweg in beton.

In bijlage A.5 zijn aantekeningen toegevoegd die betrekking hebben op schijfwerking. Hier zijn ook enkele voorbeelden van bestudeerd.

4.2. Conclusie literatuurstudie

Literatuurstudie "Tweede draagweg in de VS en GB":

Vanaf de vroege jaren 70 werd de Britse regelgeving aangepast na de gedeeltelijke instorting van een woonflat, Ronan Point, in Londen in 1968. Ten gevolge van deze ramp zijn in de Engelse regelgeving (British Standards) richtlijnen opgenomen die voortschrijdende instorting dienen te beperken. Deze richtlijnen hebben een sterke invloed gehad op enkele Amerikaanse richtlijnen en vormen de basis voor de richtlijnen tegen bijzondere belastingen zoals dat in de Eurocode is omschreven. Meer recent is er, ten gevolge van de aanslagen op 11 september 2001, ook veel gepubliceerd over maatregelen tegen voortschrijdende instorting en over bijzondere belastingsituaties. Door dit laatste zijn de maatregelen en aanbevelingen de laatste jaren nog verder ontwikkeld. Zo zijn er de afgelopen jaren vele workshops gehouden in het kader van instorting van gebouwen. Deze hebben geleid tot nieuwe inzichten in het onderwerp.



Figuur 4.1: Instorting Ronan Point, Londen, 1968.



In de VS zijn er meerdere verschillende organisaties met richtlijnen voor verschillende type gebouwen, de meeste daarvan zijn in meer- of mindere mate gebaseerd op de richtlijnen van de American Society of Civil Engineers (ASCE). Zo heeft het Amerikaanse ministerie van Defensie het Unified Facilities Criteria (UFC) uitgebracht voor gebouwen met een militaire functie; U.S. General Service Administration (GSA) heeft richtlijnen gepubliceerd voor overheidsgebouwen; en ook in de regelgeving voor het ontwerpen van de meeste andere gebouwen, vastgelegd in de International Building Codes (IBC), zijn de ASCE documenten maatgevend.

In de meeste richtlijnen wordt onderscheid gemaakt tussen een directe ontwerpstrategie en een indirecte ontwerpstrategie. In de directe ontwerpstrategie wordt het ontwerp berekend op belastingen in een buitengewone belastingcombinatie. Deze belastingcombinaties variëren per richtlijn. In de indirecte ontwerpstrategie worden geen specifieke belasting genoemd waarmee gerekend moet worden. Bij deze laatste strategie worden alleen minimum eisen gesteld aan bijvoorbeeld de ductiliteit (taaiheid) en continuïteit (samenhang) van de constructie.

Tweede draagweg valt onder de directe ontwerpstrategie. Bij deze methode dient een bezwaken onderdeel te worden aangenomen. En de resulterende schade mag dan niet disproportioneel zijn. Er wordt een redundante constructie bewerkstelligd. Deze methode benodigt een analyse van de constructie na bezwijken van het onderdeel.

Een andere methode die onder de directe ontwerpstrategie valt is die van de specifieke plaatselijke weerstand. Bij deze methode worden sleutelementen aangewezen die bestand moeten zijn tegen specifieke bijzondere belastingen.

Hiernaast is er ook sprake van algemene ontwerpstrategieën die niet constructief van aard zijn zoals de keuze van een locatie met een verminderde kans op calamiteiten.

Literatuurstudie “Tweede draagweg in Nederland”:

De inmiddels vrijgegeven Eurocode gepland is om op 1 januari 2012 in te gaan. In Europees verband is afgesproken dat de normalisatie-instituten op 1 april 2010 hun nationale normbladen zouden intrekken en NEN heeft dat inmiddels ook gedaan. De invoering van de Eurocode brengt een aantal veranderingen met zich mee. Naast verschillende ontwerpgerichtlijnen zijn er enkele belangrijke strategieverschillen.

In de Eurocode zijn passages opgenomen die betrekking hebben op het onderwerp van tweede draagweg. Deze passages zijn enigszins anders opgesteld dan die in de TGB. De Eurocode eist in feite een bepaalde strategie waarmee gekeken moet worden naar buitengewone ontwerpsituaties. In de bijlagen van de Eurocode volgen regels die als voorbeeld kunnen dienen voor een uitwerking van zo'n strategie. Dit is zo opgezet dat van ieder land een Nationale Bijlage wordt toegevoegd waarin specificaties staan van hoe men moet omgaan met deze voorbeeldberekeningen. De mogelijkheid voor een tweede draagweg wordt in de Eurocode vaker geëist dan in de TGB. Globaal gesproken kan er gezegd worden dat de Eurocode regelgeving met betrekking tot constructieve veiligheid onduidelijkheden wegneemt maar soms ook hogere eisen stelt.

5. Uitgangspunten hoofdonderzoek

Voor de berekeningen uit deze afstudeerscriptie is zoveel mogelijk gebruik gemaakt van de normen uit de eurocode. De volgende voorschriften zijn voor deze scriptie gebruikt:

- NEN-EN 1990: Grondslagen van het constructief ontwerp
- NEN-EN 1991-1-7: Belastingen op constructies – Deel 1-7: Algemene belastingen – Buitengewone belastingen: stootbelastingen en ontploffingen
- NEN-EN 1992-1-1: Ontwerp en berekening van betonconstructies - Deel 1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen

Sommige artikelen uit de VBC konden wij niet terugvinden in de eurocode, dus hebben we daarvoor, waar dit aangegeven staat, de artikelen uit de VBC toegepast.

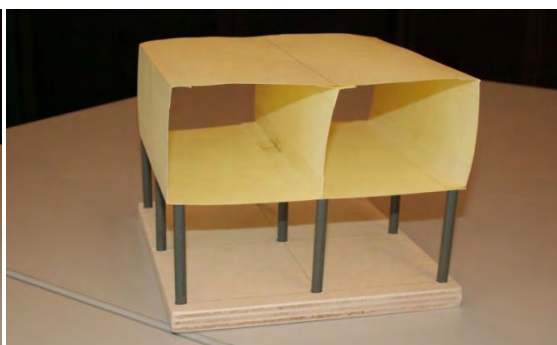
5.1. Uitgangspunten Basismodel

Voor de uitwerking van de mechanismen die een tweede draagweg kunnen verzorgen, is er een eenvoudig model opgezet, dit was al te zien in figuur 2.1. Dit model zal het uitgangspunt worden voor de berekeningen die betrekking hebben op de tweede draagweg. Telkens wanneer er een kolom verwijderd wordt, zal er gekeken worden naar de extra wapening die er nodig zal zijn om de constructie niet te laten bezwijken. Het ontwerpen van een tweede draagweg houdt bij gewapend betonconstructies immers in: het leggen van extra wapening in de constructie.

De volgende stap die gezet wordt, is het maken van maquettes. Met deze maquettes wordt het gemakkelijker om problemen uit te leggen en kunnen oplossingen makkelijker inzichtelijk worden gemaakt. In onderstaande afbeeldingen zijn deze maquettes weergegeven.



Figuur 5.1: Maquette met demontabele kolommen



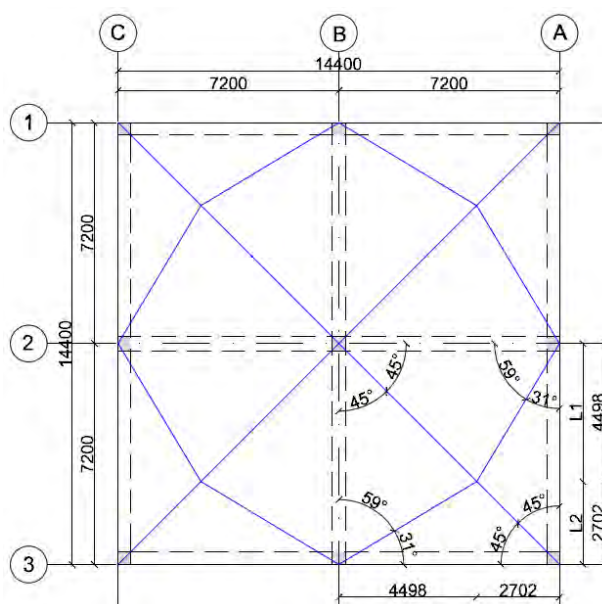
Figuur 5.2: Maquette met wanden

De constructie van het gebouw zal eerst doorgerekend worden volgens de normale regels uit de NEN-EN 1992-1-1, de betreffende artikelen zullen verderop in dit verslag genoemd worden.

De stabiliteit van de constructie zou in eerste instantie ontleend kunnen worden aan drie korte wanden van 1,5 m. Deze wanden kunnen de horizontale krachten opnemen ten gevolge van de wind en bij calamiteiten. Dit bracht echter allerlei asymmetrische effecten met zich mee waardoor de bestudeerbaarheid van de constructie verminderde. Daarom is uiteindelijk besloten aan te nemen dat de constructie zijn stabiliteit ontleend aan een oplegging die in het horizontale vlak vast zit. In het Scia Engineer model is dit toegepast op de knooppunten van de middelste kolommen, zodat er geen enkele asymmetrische effecten optraden. In figuur 2.2 t/m 2.7 zijn de locaties van de wanden nog te zien.

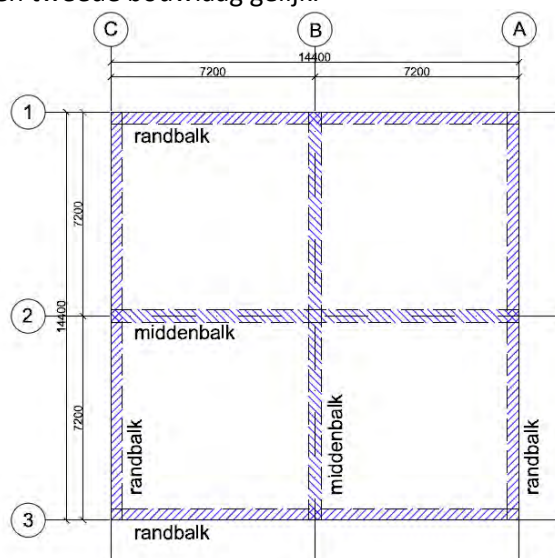
De vloeren dragen hun belasting af naar de onderliggende balken. Er zal eerst (in hoofdstuk 5.3.3) berekend worden of de balken een starre of verende ondersteuning vormen voor de vloeren. Dit type ondersteuning zal invloed hebben op de locatie van de wapening, wanneer er een verende ondersteuning gevormd wordt, zal er een breedte voor een wapeningsbaan bepaald moeten worden met wapening evenwijdig aan de balkwapening. Er zal dan een percentage berekend worden voor de belasting die naar de balken afgedragen wordt, de resterende belasting gaat dan via de wapeningsbanen in de vloer.

De belastingafdracht van de vloeren op de balken zal er in een plattegrond uitzien zoals in figuur 5.3 te zien is. De vloeren lopen in het midden door, dus deze balken zullen veel meer belasting krijgen dan de randbalken. Deze belastingafdracht is bepaald conform de NEN 6720, artikel 7.5.1.6.



Figuur 5.3: Belastingafdracht op de balken.

Bij de berekening van de balken wordt er gesproken over ‘randbalken’ en ‘middenbalken’, in figuur zal aangegeven worden waar deze rand- en middenbalken in de plattegrond zitten. De locatie voor de balken in voor de eerste en tweede bouwlaag gelijk.



Figuur 5.4: De locatie voor rand- en middenbalken.

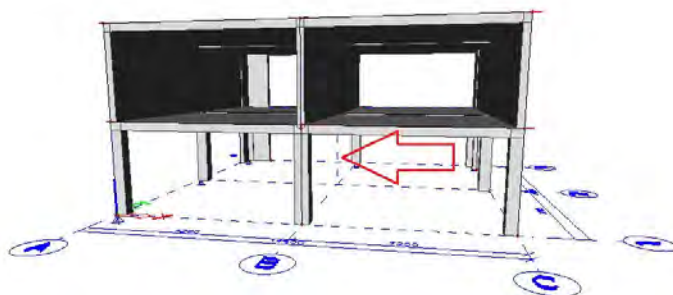


In hoofdstuk 5.3.5 zal de kolomberekening nader toegelicht worden. In eerste instantie waren alle afmetingen van de kolommen bepaald aan de hand van de slankheids eis volgens de NEN-EN 1992-1-1. Door deze methode toe te passen, trad in elke kolom een andere spanning op. Uit de controle met Scia Engineer bleek dat dit verschil in spanning grote gevolgen had voor de zakking van de kolommen en bovenliggende vloer. In hoofdstuk 5.4, waarin het basismodel in Scia Engineer behandeld wordt, zal hier verder op ingegaan worden.

Deze berekening zal eerst met de hand uitgevoerd worden en daarna volgt er een controle met Scia Engineer, zie hoofdstuk 5.4 voor meer informatie daarover.

5.2. Situaties 1, 2 en 3

Er worden 3 verschillende situaties bekeken waarbij drie keer een andere kolom weggehaald wordt. In situatie 1 wordt een hoekkolom weggehaald en worden er modellen opgezet om te benaderen wat er dan met de overige constructie gaat gebeuren. In situatie 2 wordt er een middenkolom weggehaald en zal met behulp van Scia Engineer naar de overige constructie gekeken worden. In situatie 3 zullen de kolommen op de verdieping vervangen worden door drie wanden die evenwijdig aan elkaar staan. Deze wanden staan op de assen A, B en C. Wanneer er dan in situatie 3 één kolom op de begane grond weggehaald wordt, zullen de wanden zich als schijven gaan gedragen. Er wordt dan met behulp van Scia Engineer gekeken naar een oplossing voor de verzorging van een tweede draagweg. Zie de figuren 2.2, 2.4 ter illustratie van respectievelijk situatie 1 en 2. Situatie 3 is weergegeven in figuur 5.5.



Figuur 5.5: Afbeelding van situatie 3, de middenkolom op de begane grond is weggefallen in een kolommenstructuur met wanden op de verdieping.

5.3. Handberekening basismodel

In dit hoofdstuk zal worden ingegaan op de handberekening van het basismodel. De berekening zelf is gemaakt met behulp van Microsoft Office Excel 2007 en is te vinden in bijlage B.1 en B.2. In bijlage B.1 is de gewichtsberekening/belastingaannamen en de berekening te vinden van vloeren, balken en kolommen. In bijlage B.2 is de controle van scheurvorming te vinden. Hierna zullen de verschillende hoofdstukken uit de berekening nader toegelicht worden.

5.3.1. Projectgegevens

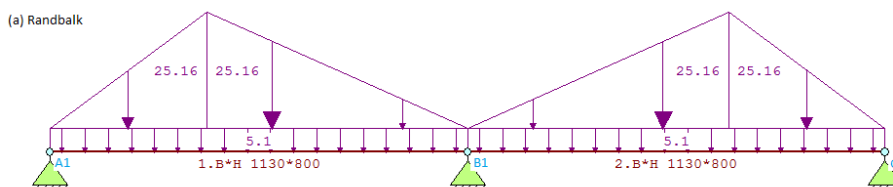
Voor de standaard situatie is ervan uitgegaan dat het gebouw valt onder gevolgklasse CC2b. Deze gevolgklasse is terug te vinden in de NEN-EN 1991-1-7; het houdt in dat het bij bezwijken middelgrote gevolgen heeft. Meer achtergrondinformatie over deze gevolgklassen is te vinden in bijlage A.1. Hiervoor is gekozen, omdat voor het ontwerpen van een tweede draagweg het gebouw doorgaans ook in gevolgklasse CC2b of CC3 valt. Voor de belastingcombinaties is in de normale situatie aangehouden:

$$1,2G_k + 1,5Q_k > 1,35G_k + 1,5Q_k \cdot \Psi_0$$

$1,2G_k + 1,5Q_k$ is hier maatgevend, voor een randbalk geldt in UGT bijvoorbeeld:

$q_{Ed,max} = 1,2 \cdot (9,3 \cdot 2,7 + 5,1) + 1,5 \cdot (2,5 \cdot 2,7) = 46 \text{ kN/m}$. Waarin: $G_k = P_{vloer} + \text{eigen gewicht balk}$, $Q_k = \text{variabele belasting op vloer}$

In figuur 5.6 is een afbeelding te zien van een randbalk, met daarop de permanente belasting. De hoogte van de driehoeksbelasting is: $9,3 \cdot 2,7 = 25,1 \text{ kN/m}^2$, het eigen gewicht van de balk wordt daar nog bij op geteld.



Figuur 5.6: Mechanicaschema van een randbalk met permanente belasting.

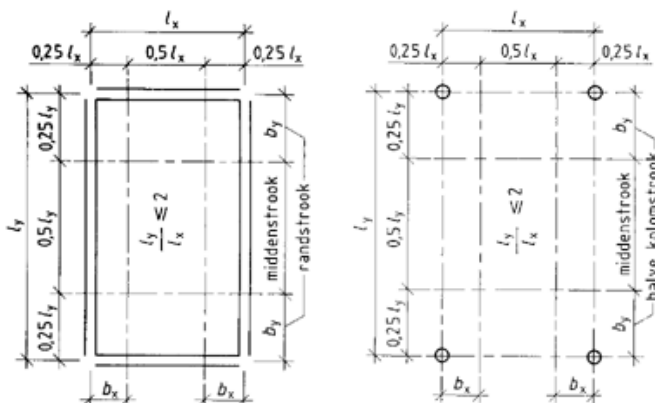
5.3.2 Vloerberekening

Stijfheidverhoudingen

Voor de bepaling van de vloerwapening zal er eerst bepaald worden of de balken een starre of verende ondersteuning vormen voor de vloer. Dit kan worden bepaald met de NEN 6720 TGB, artikel 7.1.4. De mate van starheid wordt uitgedrukt in ρ (rho). In de berekening wordt onderscheid gemaakt tussen de randbalk en de middenbalk, maar later zal het gemiddelde van de balken worden gebruikt voor het berekenen van de wapening.

Om de mate van starheid van de balken te bepalen, worden de richtlijnen uit artikel 7.1.4 van de NEN 6720 opgevolgd. Er blijkt dan dat de balken voor ongeveer 35% als starre ondersteuning werken. Er kan aan de hand van deze starheid gezegd worden dat de balk zal werken als verende ondersteuning. Een gedeelte van de totale vloerbelasting zal dan afgedragen worden via de balken, maar er zal ook een gedeelte van de belasting via kolomstroken worden afgedragen naar de kolommen. Zie bijlage B.1 (in het hoofdstuk 'vloerberekening') van de projectbijlagen voor de bepaling van de mate van starheid van de balk.

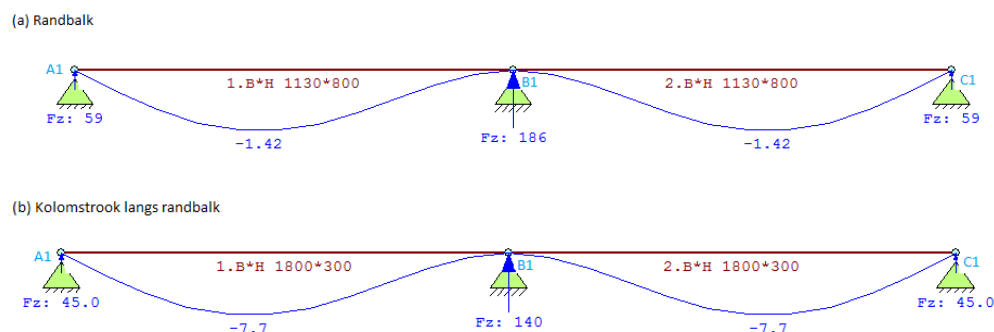
In Technosoft is de zakking van de balk en de zakking van de kolomstrook getoetst in de vloer bij 100% van de belasting. De kolomstrook is een verborgen strook in de vloer, langs de balk, met een breedte conform artikel 7.5.3.4 uit de NEN 6720 TGB ($0,25L_{x,y}$), zie figuur 5.7.



Figuur 5.7: Bepaling breedte van kolomstrook.



De totale maximale belasting is op de balk gezet en vervolgens is er gekeken naar de maximale zakking. De totale belasting is ook op de kolomstrook gezet en daarna is ook bij de kolomstrook gekeken naar de maximale zakking. Voor de invoer is een elasticiteitsmodulus van 10.000 N/mm^2 aangehouden, omdat de balk op buiging is belast. Het traagheidsmoment van de balk is bepaald in bijlage B.1 hoofdstuk 5 'Dimensionering balken' in de projectbijlagen. Er is in dat hoofdstuk uitgelegd welke balkafmetingen er gebruikt worden voor de berekening (de randbalk heeft een L-vorm en de middenbalk heeft een T-vorm). Zie figuur 5.8 (a en b) voor de vervorminglijn van de randbalk respectievelijk de kolomstrook langs de randbalk met elk 100% van de belasting.



Figuur 5.8: Vervorminglijn van de randbalk (a) en kolomstrook langs de randbalk (b) met elk 100% van de belasting.

Vervolgens wordt per type balk bepaald hoe groot de zakking van de balk en de kolomstrook opgeteld is.

Het bepalen van de stijfheidverhouding is ook met Scia Engineer berekend (zie ook bijlage B.3), dit bleek een erg complexe berekening te zijn. Voor de verdere berekening worden de gemiddelden van de percentages uit Scia Engineer en Technosoft genomen:

- Alle balken dragen 75% van de totale belasting af naar de kolommen;
- Alle vloeren dragen $(100-75=)$ 25% van de totale belasting af naar de kolommen.

Kolomstrookwapening

Omdat de balk slechts 75% van de totale belasting uit de vloer zal afdragen naar de kolommen, zullen er stroken in de vloer langs de balken gaan meewerken met de balk. Deze stroken worden in de NEN 6720 TGB art. 7.5.3.4. kolomstroken genoemd. De randstroken hebben een breedte van $0,25 \cdot L_x$ en de middenstroken hebben een breedte van $0,5 \cdot L_x$ (zowel in de x- als y-richting), zie figuur 5.7.

De wapening voor de kolomstrook zal op dezelfde manier worden bepaald als voor een balk. De breedte is hierbij: $0,25 \cdot 7,2 = 1,8\text{m}$. Voor de hoogte van de strook wordt de hoogte van de vloer aangehouden van 300mm.

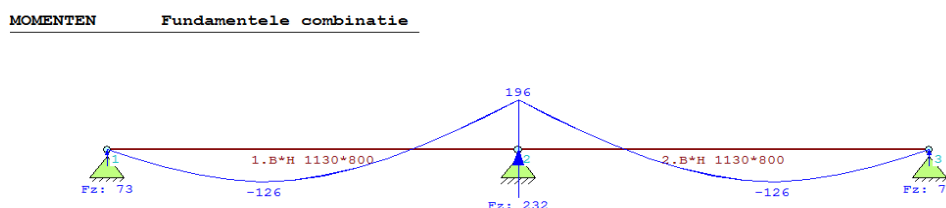
5.3.3 Balkberekening

Zoals in hoofdstuk 5.3.3 is bepaald, draagt de balk 75% van de vloerbelasting af naar de kolommen. De balk en de vloer worden aan één stuk gestort, dus de vloer zal over een bepaalde breedte meewerken met de balk. In artikel 7.1.7 van de NEN 6720 is te vinden hoe groot de meewerkende breedte b_e is die bij de balk meegerekend kan worden.

Randbalk

In de balkberekening van bijlage B.1 wordt de doorsnede berekend van de randbalk met een meewerkende breedte van de vloer ten behoeve van een grotere stijfheid van de balk. Deze meewerkende breedte hebben we gebruikt voor de bepaling van de stijfheidsverhouding, zoals te zien is in hoofdstuk 5.3.3.

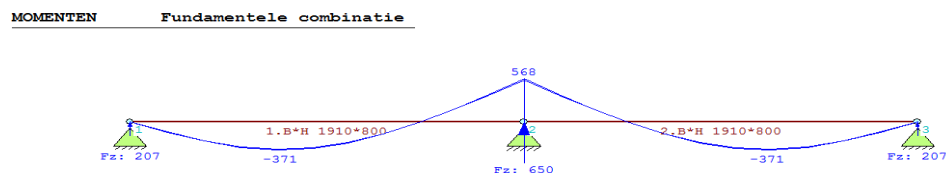
Het moment dat in Technosoft is bepaald (zie figuur 5.9) zal vermenigvuldigd worden met 75%, omdat er aangenomen was dat de balken 75% van de belasting, dus 75% van het moment opnemen. Het maximale moment waarop de balk gewapend dient te worden is: $196 * 75\% = 147$ kNm. Het veldmoment in de balk zal zijn: $126 * 75\% = 95$ kNm. Zie voor de wapeningberekening bijlage B.1, hoofdstuk 6 'Dimensionering balken'.



Figuur 5.9: Momentenlijn van de randbalk in UGT.

Middenbalk

In bijlage B.1 is de berekening van de balk te vinden (hoofdstuk 6 'Dimensionering balken'). De middenbalk draagt 75% van de belasting af naar de kolommen, zoals in hoofdstuk 5.4.3 is bepaald. Het moment dat in Technosoft is bepaald (zie figuur 5.10) zal ook vermenigvuldigd worden met 75%. Het maximale moment waarop de middenbalk gewapend dient te worden is: $568 * 75\% = 426$ kNm. Het veldmoment in de balk zal zijn: $371 * 75\% = 278$ kNm.

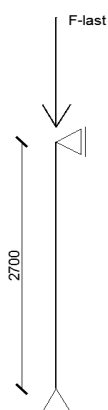


Figuur 5.10: Momentenlijn van de middenbalk.

5.3.4 Kolomberekening

Voor de berekening van de kolommen is uitgegaan van de slankheidsis uit de NEN-EN 1992-1-1.

Slankheid kolom



In figuur 5.11 is het mechanischschema te zien van de kolommen in het basismodel. De kolommen zijn boven en onder schuierend verbonden met de constructie, zodat er geen momenten worden overgedragen.

De maximale normaalkracht op de middenkolom op de verdieping is: 1.330 kN. De aangenomen afmetingen van deze kolom zijn BxH: 500 x 500 mm. Volgens de NEN-EN 1992-1-1 voldoen deze kolomafmetingen bij de genoemde normaalkracht en de lengte zoals in figuur 5.11. Ook hoeft hiervoor geen tweede orde berekening gemaakt te worden, omdat de afmetingen groot genoeg zijn zodat er geen tweede orde effect op zal treden.

Figuur 5.11: Mechanischschema van een randkolom.



Uit de berekening met Scia Engineer is gebleken dat de onderlinge zakking van de kolommen nogal verschilt. Dit verschil in de zakking had als gevolg dat de vloeren zich ook anders gingen gedragen dan berekend was met de handberekening. Om de zakking van de kolommen per verdieping toch overal gelijk te krijgen hadden we voor het bepalen van de afmetingen beter uit kunnen gaan van de spanningen in de kolommen. De spanning in de hoekkolom (deze heeft de kleinste spanning) is bijvoorbeeld ($\sigma=F/A$): $(156 \cdot 10^3)/(290 \cdot 290) = 1,85 \text{ N/mm}^2$. In de rest van de kolommen moet deze spanning ook optreden, zodat de kolommen evenveel zakken en er in de vloeren ook momenten zullen optreden die bepaald zijn met de handberekening. Zie tabel 5.1 voor de afmetingen van de overige kolommen, gebaseerd op de hoekkolom op de verdieping voor de kolommen op de verdieping. De kolommen op de begane grond zijn gebaseerd op de hoekkolom op de begane grond.

Tabel 5.1: Kolomafmetingen

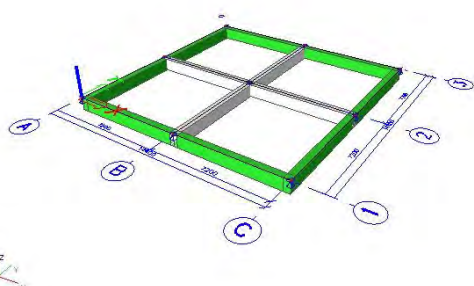
Locatie	N_{Ed}	Afmeting
Middenkolom verdieping	1.330 kN	847 x 847 mm
Randkolom verdieping	456 kN	496 x 496 mm
Hoekkolom verdieping	156 kN	290 x 290 mm
Middenkolom begane grond	2.547 kN	973 x 973 mm
Randkolom begane grond	903 kN	580 x 580 mm
Hoekkolom begane grond	329 kN	350 x 350 mm

Een controle in Scia Engineer bevestigt dat er nu overal ongeveer dezelfde zakking uitkomt, zie hoofdstuk 5.4.

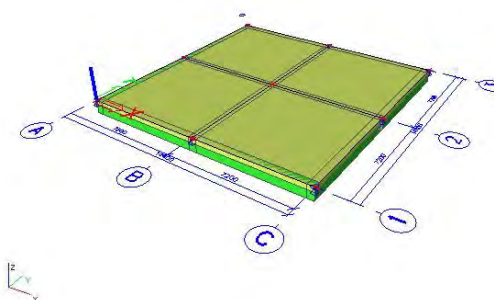
5.4 Scia Engineer berekening basismodel

In Scia Engineer wordt het basismodel ook doorgerekend om geanalyseerd te kunnen worden bij de verschillende calamiteitensituaties. De afmetingen van de balken en vloeren zijn gelijk gehouden aan die van de handberekening. Echter, om het model zuiver te houden, i.e. te zorgen dat alle kolommen even veel zakken zijn andere kolomafmetingen toegepast dan in tabel 5.1. Deze kolomafmetingen zijn te vinden in bijlage B.3 in de Scia Engineer uitdraai van het basismodel.

Tevens is een berekening opgezet van de stijfheidverhoudingen van de middenbalken en randbalken. Daarbij zijn een model met alleen balken (balkmodel, zie figuur 5.12) en een model met zowel balken als vloeren (vloermodel, zie figuur 5.13) opgesteld; door de balkmomenten in de verschillende modellen te vergelijken, kan worden berekend welke stijfheidverhoudingen de balken en vloeren hebben. Deze analyse is uitgebreid opzet en dient tevens om aan te tonen in hoeverre de handberekeningen Scia Engineer overeenkomen. Enkele moeilijkheden worden geanalyseerd en er wordt ingegaan op de manier waarop Scia Engineer zijn resultaten weergeeft. Deze analyse is te vinden in de eerste 3 hoofdstukken van bijlage B.3.

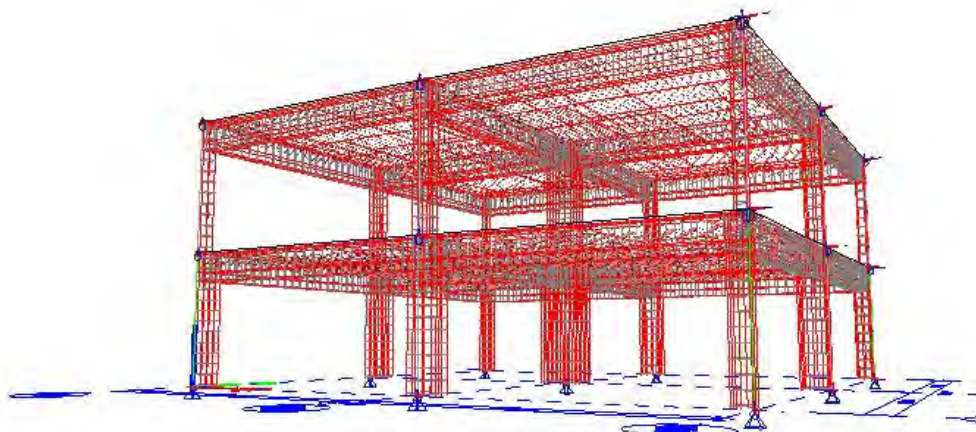


Figuur 5.12: Balkmodel



Figuur 5.13: Vloermodel

Vervolgens is berekend wat in de UGT de benodigde wapening is. Hierbij is echter alleen rekening gehouden met de benodigde wapening die Scia Engineer berekend heeft. Bijvoorbeeld de verdeelwapening wordt niet meegenomen. Dit is gedaan om een beter beeld te scheppen van de effecten van een calamiteit op de benodigde wapening in een constructie. Een afbeelding van de totaal gewapende constructie is weergegeven in figuur 5.12.



Figuur 5.12: Basismodel, volledig gewapend in UGT met Scia Engineer.

Aan bijlage B.3 is o.a. een uitdraai van het basismodel in Scia Engineer toegevoegd met daarin van pagina 15 t/m 19 een wapeningsoverzicht. In latere modellen en situaties kan op basis van dit basismodel vergeleken worden hoeveel extra wapening benodigd is.

6. Hoofdonderzoek

In dit hoofdstuk zullen de ontwerpen voor de verzorging van een tweede draagweg toegelicht worden voor de 3 situaties die genoemd zijn in hoofdstuk 5.2. Wanneer er een kolom in een constructie plotseling bezwijkt kan men spreken van een calamiteit. In zo'n calamiteitsituatie mag er gerekend worden met aangepaste veiligheidsfactoren voor de berekening van de constructie. De volgende uitgangspunten gelden voor alle situaties.

Uitgangspunten voor het ontwerp van een tweede draagweg

In de NEN 6720 staat een factor waarmee f'_b mee mag worden vermenigvuldigd bij calamiteiten van 0,72 in plaats van 0,6 in de normale situatie. In de NEN-EN 1992-1-1 is naar de waarde gezocht waarmee f_{cd} vermenigvuldigd mag worden bij calamiteiten, maar deze kon nergens teruggevonden worden. Daarom is voor f_{cd} (voor betonkwaliteit C28/35) bij calamiteiten een waarde aangehouden van $28 \cdot 0,72 = 20,16 \text{ N/mm}^2$.

Voor f_{yd} (voor staalkwaliteit B500) bij calamiteiten zal worden gerekend met een waarde van 500 N/mm^2 .

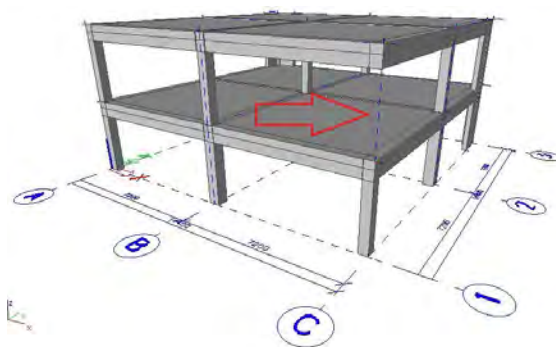
Voor de belastingfactoren zijn de volgende waarden gebruikt: $1,0G_k + 1,0Q_k \cdot \Psi_2$

Volgens de NEN-EN 1992-1-1 mag er bij calamiteiten een factor van Ψ_2 toegepast worden voor de veranderlijke belasting.

Voor een randbalk levert dit bijvoorbeeld een belasting op van: $q_d = 1,0 \cdot (25,2 + 5,1) + 1,0 \cdot 6,8 \cdot 0,3 = 32,3 \text{ kN/m}$.

6.1 Situatie 1: hoekkolom valt weg

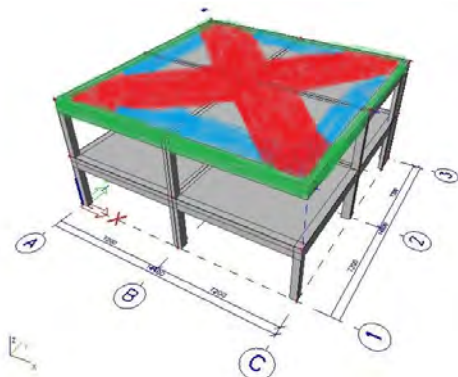
Voor dit onderzoek is eerst een hoekkolom weggehaald, zie figuur 6.1. Dit model is het uitgangspunt voor het ontwerp van een tweede draagweg in situatie 1.



Figuur 6.1: Afbeelding van situatie 1, waarbij de hoekkolom op de verdieping is weggefallen.

In deze situatie zal de vloer een grote uitkraging zijn, waardoor er bovenmomenten ontstaan. Deze momenten kunnen niet opgevangen worden met de wapening uit het basismodel en daarom zal er extra wapening bijgelegd moeten worden. Om voor deze situatie een ontwerp te maken voor de tweede draagweg, zijn daarvoor 3 modellen opgezet. Bij model 1 zal de balk het extra moment dat door de uitkraging ontstaat opnemen. Er zal dan extra wapening boven in de balk gelegd moeten worden (zie bijlage C.1). Het principe van model 2 lijkt erg op dat van model 1, maar bij model 2 neemt de wapening in de kolomstrook het extra moment op (zie bijlage C.2). In model 3 zullen er verborgen stroken in de vloer ontstaan en in deze verborgen stroken zal de wapening bepaald

worden (zie bijlage C.3). In figuur 6.2 is aangegeven waar in de verschillende modellen de extra wapening bijgelegd wordt in de constructie.



Figuur 6.2: Extra bijlegwapening, model 1 in het groen, model 2 in het blauw en model 3 in het rood.

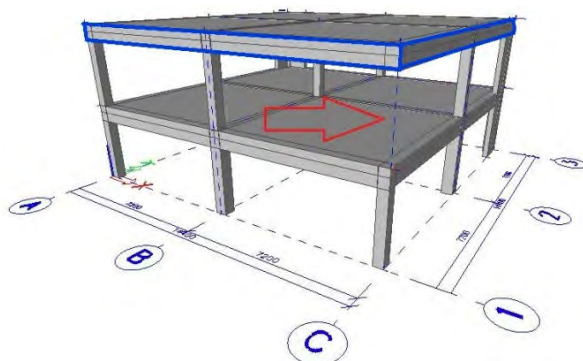
Deze modellen zijn met de hand berekend en later zijn deze met behulp van Scia Engineer gecontroleerd. Te verwachten is dat model 1 het minste vervorming geeft, model 2 wat meer en model 3 het meeste vervorming. In model 1 zullen de balken het extra moment opnemen, en in model 2 en 3 de vloer. De balk is veel stijver dan de vloer, met een hoogte van respectievelijk 800 mm en 300 mm, dus is dit een aannemelijke volgorde voor de modellen om aan te houden in volgorde van vervorming. We willen per model dus ook graag weten hoe groot de verticale vervorming is ter plaatse van de weggevallen kolom.

6.1.1 Model 1: De balk neemt het extra moment op (zie bijlage C.1)

In model 1 is er vanuit gegaan dat de randbalk het extra moment opneemt dat ontstaat wanneer de hoekkolom wegvalt. De kolomstrook langs deze randbalk zal alleen het moment opnemen welke de aanwezige wapening uit de UGT kan opnemen. Daartoe zal een stappenplan doorlopen worden, deze worden hierna genoemd en beschreven. De berekening van model 1, is te vinden in bijlage C.1.

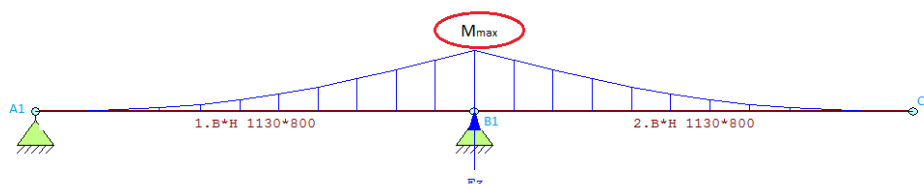
Stap 1: Berekening van de balkmomenten

In dit model gaan we ervan uit dat de randbalken boven de hoekkolom (de betreffende balken zijn in figuur 6.3 blauw omkaderd) het extra moment, dat zal ontstaan door het wegvallen van een hoekkolom, kan opnemen. In de eerste stap zal er bepaald worden wat het totale moment is boven de kolom op bijvoorbeeld as C2 (= as B1). Dit moment kan bijvoorbeeld met Technosoft bepaald worden, zie figuur 6.4.



Figuur 6.3: Afbeelding van situatie 1 met de randbalken aangegeven die het extra moment opnemen.

MOMENTEN B.C:4 Buitengewone belastingsituatie



Figuur 6.4: Momentenlijn in de buitengewone belastingcombinatie met een maximaal moment.

Stap 2: Bepalen van het restmoment

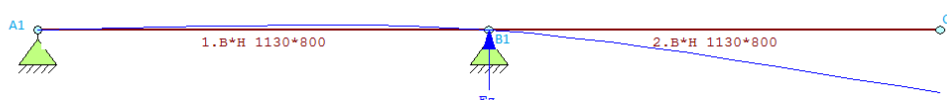
De kolomstrook langs de balk en de balk zelf nemen in de UGT een bepaald moment op en daar ligt dus al een basiswapening. Deze basiswapening kunnen in de situatie met calamiteiten een groter moment opnemen, omdat er lagere veiligheidsfactoren toegepast mogen worden. Zoals in hoofdstuk 5.2 bepaald is de belasting op de randbalk 46 kN/m. Bij calamiteiten mag gerekend worden met een balkbelasting van: 32,3 kN/m. Dit is 30% minder belasting dan in UGT. Ook mogen er voor f_{cd} en f_{yd} hogere waarden aangehouden worden, zodat de basiswapening in UGT meer moment op kan nemen dan de basiswapening bij calamiteiten.

Het nieuwe moment kan van M_{max} uit de vorige stap af gehaald worden. Dan blijft er een restmoment over. Op dit restmoment kan de bijlegwapening bepaald worden.

Stap 3: Bepaling van de zakking

Uitgangspunt is dat de balk zoveel zal vervormen dat het maximale vloeimoment van de balk net niet gehaald wordt. Om de juiste zakking te kunnen bepalen zal aan de hand van een M-Kappa diagram de balk opgedeeld worden in vijf stukken met verschillende waarden voor EI . Ook zal voor een goede bepaling van de zakking gekeken worden naar de indrukking van de kolom en/of de verdraaiing van het stuk achterliggende stuk balk. Zie figuur 6.5 voor een globale vervormingslijn van de balk. De maximale zakking van de balk zal ongeveer 65 mm bedragen.

VERPLAATSINGEN B.C:4 Buitengewone belastingsituatie



Figuur 6.5: Zakkinglijn van de nog niet opgedeelde balk.

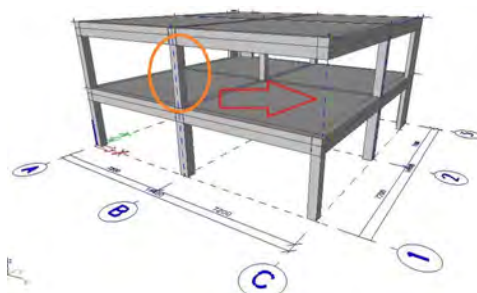
Stap 4: Bepaling hoeveelheid extra wapening

De berekende hoeveelheid wapening in de balken zal worden vergeleken met de wapening uit het basismodel. Deze extra wapening is getekend en in een tabel gezet, zie bijlage C.1 'Berekening bijlegwapening model 1' en tekeningnummer W-110 voor een overzicht van de bijlegwapening.

Stap 5: Controle randkolom

Wanneer er in situatie 1 een hoekkolom wegvalt, zullen de randkolommen aan beide zijden van die hoekkolom meer belasting af moeten dragen, zie figuur 6.6. In deze stap wordt gecontroleerd hoe groot die extra belasting op een randkolom zal zijn, zie ook bijlage C.1, hoofdstuk: 'controle randkolom onder dakvloer'.

Uit de controle blijkt dat de belasting die bij calamiteiten op de kolom zal komen, kleiner is dan de belasting op de kolom in de basissituatie.



Figuur 6.6: Met oranje is een randkolom omcirkeld die gecontroleerd wordt in bijlage C.1.

Stap 6: Controle met Scia Engineer

Naast berekeningen met de hand wordt ook in het programma Scia Engineer dit model getekend. Op die manier wordt het mogelijk om te controleren in hoeverre het model dat met de hand is berekend, klopt. En kan inzicht verkregen worden in het werkelijke gedrag van de constructie. Deze berekeningen zijn ook opgenomen in bijlage C.1.

6.1.2 Model 2: de kolomstrook neemt het extra moment op (zie bijlage C.2)

In model 2 is er vanuit gegaan dat de kolomstrook langs de randbalk het extra moment dat ontstaat, wanneer de hoekkolom wegvalt, opneemt. De randbalk langs deze kolomstrook zal alleen het moment opnemen dat de aanwezige wapening uit de UGT kan opnemen. Voor dit model kan hetzelfde stappenplan doorlopen worden als bij model 1, maar dan met de waarden die bij de kolomstrook horen. De berekening die bij model 2 hoort, is te vinden in bijlage C.2.

Het restmoment dat de kolomstrook dient op te nemen zal 304 kNm bedragen. Op dit moment zal de extra wapening bepaald worden.

Aan de hand van het M-kappa diagram is gebleken dat de vervorming van de kolomstrook ongeveer 327 mm zal bedragen.

De extra wapening is getekend en in een tabel gezet, zie bijlage C.2 'Berekening bijlegwapening model 2' en tekeningnummer W-110 voor een overzicht van de bijlegwapening.

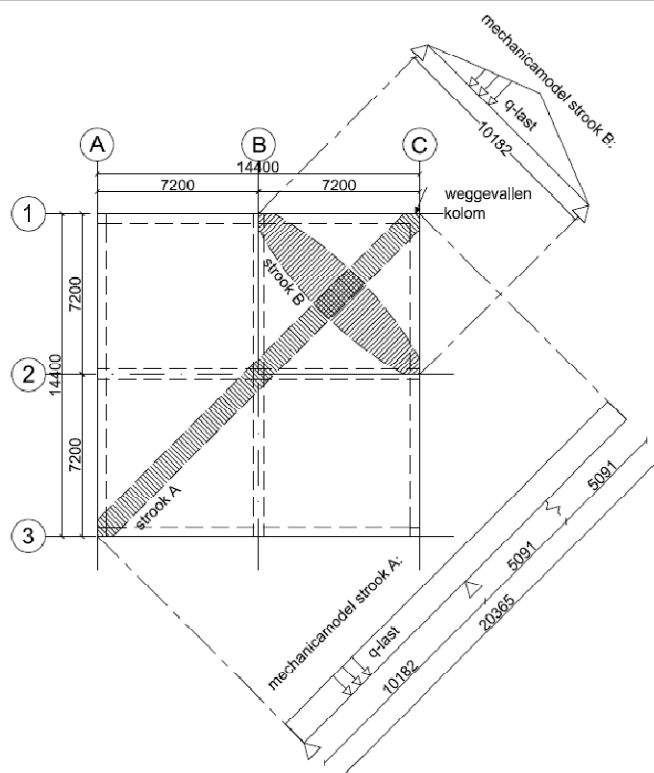
Naast berekeningen met de hand wordt ook dit model in het programma Scia Engineer uitgerekend. Deze berekeningen zijn ook opgenomen in bijlage C.2.

6.1.3 Model 3: de vloer neemt het extra moment op (zie bijlage C.3)

In model 3 is er vanuit gegaan dat de randbalken en kolomstroken langs de randbalken het moment opnemen dat de aanwezige wapening uit de UGT kan opnemen. De vloer gaat hierbij werken als een uitkraging. In dit model wordt bepaald waar in de vloer versterkte stroken zitten en hoeveel extra wapening er nodig is in die stroken om de constructie te kunnen laten hangen. De berekening die bij model 3 hoort is te vinden in bijlage C.3.

Stap 1: Bepalen van de vloerstroken

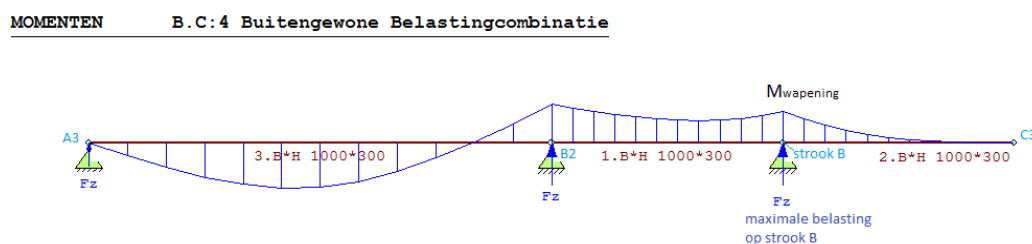
Voor de handberekening wordt er vanuit gegaan dat de balken en kolomstroken langs de balken niet meewerken in de belastingafdracht. De verborgen balken in de vloer die bij dit model gaan werken kunnen nu bepaald worden. Er zullen twee stroken gaan werken: deze worden strook A en strook B genoemd, zie figuur 6.7.



Figuur 6.7: De verborgen balken A en B in de vloer.

Stap 2: Berekenen van de momenten in de vloerstroken

De vloerstrook kan in Technosoft ingevoerd worden en dan kan het maximale moment bepaald worden waarop gewapend zal worden. Zie figuur 6.8 voor de momentenlijn van strook A. Strook B is een ligger op twee steunpunten en daar zal een groot veldmoment ontstaan. De maximale belasting op strook B is gelijk aan de reactiekracht uit strook A (ter plaatse van het kruispunt van strook A met strook B).

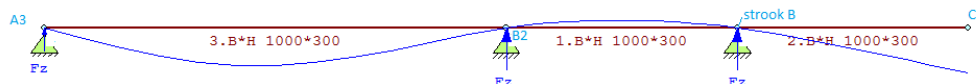


Figuur 6.8: Momentenlijn van strook A.

Stap 3: Bepaling van de zakking

Uitgangspunt is dat de vloer zoveel zal vervormen dat het maximale vloei-moment van de vloer niet gehaald wordt. Om de juiste zakking te kunnen bepalen zal aan de hand van een M-Kappa diagram de uitkraging van strook A opgedeeld worden in vijf stukken met verschillende waarden voor EI. Zie figuur 6.9 voor een globale vervormingslijn van vloerstrook A. Deze vloerstrook zal 78 mm gaan vervormen, maar er is dan nog geen rekening gehouden met de zakking van strook B, welke in figuur 6.9 nog als hard steunpunt is geschematiseerd.

VERPLAATSINGEN B.C:4 Buitengewone Belastingcombinatie



Figuur 6.9: Zakkinglijn van vloerstrook A.

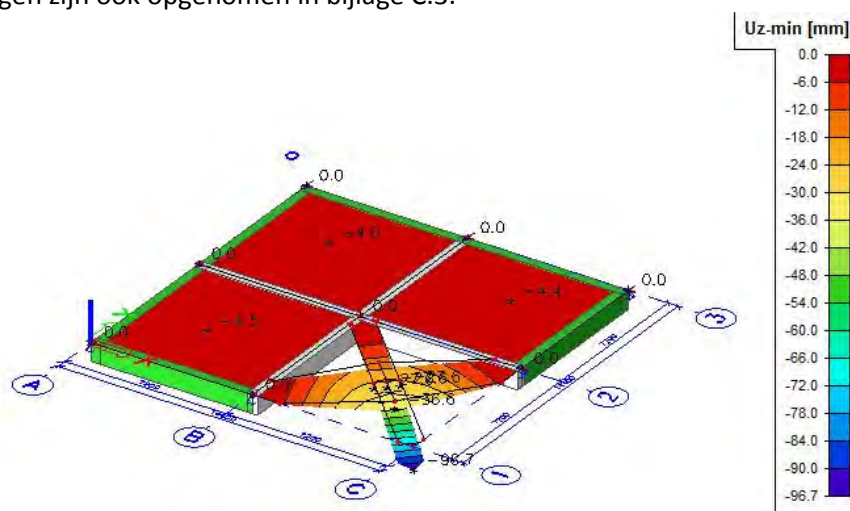
De zakking van strook B heeft ook invloed op de verticale verplaatsing van het punt C3 in figuur 6.9. Over een lengte van 5 meter zal strook A ten gevolge van strook B 167 mm zakken. Daarna kraagt strook A nog eens 5 meter uit, dus wordt de totale zakking in C3 ongeveer: $167 \cdot 2 + 78 = 412$ mm.

Stap 4: Bepaling hoeveelheid extra wapening

De berekende hoeveelheid wapening in de vloerstroken zal worden vergeleken met de wapening uit het basismodel. Deze extra wapening is getekend en in een tabel gezet, zie bijlage C.3 'Berekening bijlegwapening model 3' en tekeningnummer W-120 voor een overzicht van de bijlegwapening.

Stap 5: Controle met Scia Engineer

Ook dit model zal vervolgens met behulp van Scia Engineer bestudeerd worden, door de stroken A en B in te voeren. Op deze manier wordt inzichtelijk wat de vervorming van en de momenten in de stroken zijn. Er wordt daarbij een extra q-last op strook B gezet worden op de plek waar de vloer is weggehaald, om het juiste maximale veldmoment te kunnen bepalen in strook B. Deze berekeningen zijn ook opgenomen in bijlage C.3.

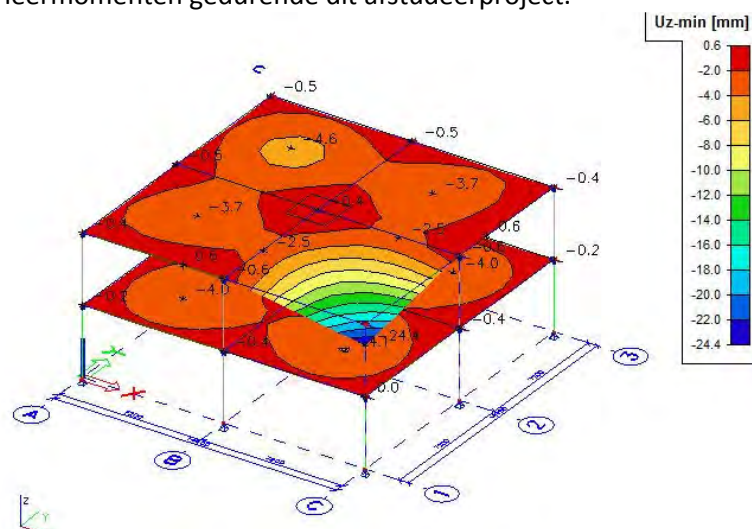


Figuur 6.10: De zakking van model 3, berekend met Scia Engineer.

6.1.4 Totaalmodel: de gehele constructie neemt het extra moment op (zie bijlage C.4)

In het laatste model is de hele constructie in Scia Engineer ingevoerd en is gekeken naar een mogelijk ontwerp voor een tweede draagweg die daaruit te analyseren was. Deze berekeningen zijn opgenomen in bijlage C.4. Het bleek echter al snel dat er niet één specifiek model, zoals in hoofdstuk 6.1.1 t/m 6.1.3, ging werken, maar dat er een mix van verschillende modellen ontstond. De zakking van het totaalmodel was echter lager dan uit de afzonderlijke modellen bleek, zie figuur 6.11 voor een afbeelding van de zakking.

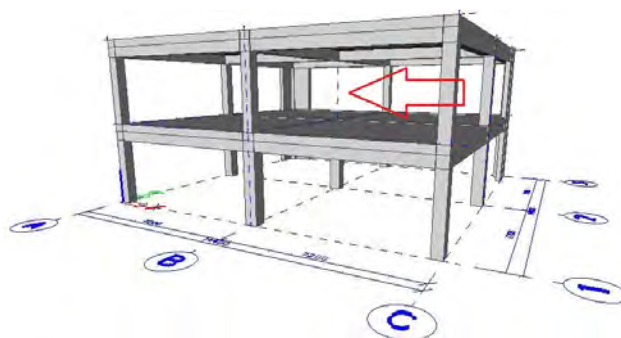
De analyse van de resultaten uit de verschillende modellen en de totaalsituatie is vooraan bijlage C te vinden. Door de verschillen die uit de resultaten van de handberekening en Scia Engineer kwamen te analyseren en vergelijken, is er een belangrijk leermoment ontstaan. Zie ook hoofdstuk 8 en bijlage F.1 voor belangrijke leermomenten gedurende dit afstudeerproject.



Figuur 6.11: De zakking van het totaalmodel, berekend met Scia Engineer.

6.2 Situatie 2: middenkolom valt weg

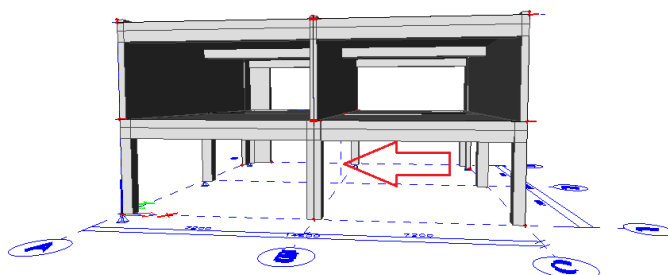
In situatie 2 zal er een middenkolom weggehaald worden en met Scia Engineer wordt er dan gekeken naar de gevolgen en naar de tweede draagweg die dan toegepast kan worden. Daarbij wordt o.a. gekeken naar de benodigde hoeveelheden extra wapeningsstaal. Deze resultaten zijn te vinden in bijlage D.



Figuur 6.11: Afbeelding van situatie 2, waarbij de middenkolom (in een kolommenstructuur) op de verdieping is weggefallen.

6.3 Situatie 3: middenkolom valt weg, wanden op 1^e verdieping

In situatie 3 zullen er in plaats van kolommen wanden op de eerste verdieping staan, zie figuur 6.12. de middenkolom op de begane grond zal dan wegvallen en met behulp van Scia Engineer zal er dan gekeken worden welke invloed deze calamiteit heeft op de momenten in de wanden en de benodigde wapening. Daarbij wordt o.a. gekeken naar de benodigde hoeveelheden extra wapeningsstaal. Deze resultaten zijn te vinden in bijlage E.



Figuur 6.12: Afbeelding van situatie 3, waarbij de middenkolom op de begane grond is weggefallen in een kolommenstructuur met wanden op de verdieping.

7. Resultaatanalyse en conclusies

Aangezien er heel veel resultaten uit de verschillende berekeningen zijn gekomen, zowel uit het basismodel als uit de berekeningen van de modellen ten behoeve van een tweede draagweg (en de handberekeningen als de berekeningen met Scia Engineer), zal in hoofdstuk 7.1 kort op de belangrijkste resultaten ingegaan worden. Bij de resultaten zal verwezen worden naar de betreffende bijlagen waar een uitgebreidere analyse is gedaan en er dieper op de resultaten is ingegaan. De meeste resultaten hebben overigens ook geleid tot een belangrijk leermoment, dus in hoofdstuk 9 wordt er op een aantal resultaten ook nog kort ingegaan. Hierdoor overlappen hoofdstuk 7 en 8 elkaar voor een groot deel. Echter, dit geeft wel aan dat er veel is geleerd tijdens dit afstudeeronderzoek.

7.1 Analyse van de resultaten

Algemeen

Uit de berekeningen in Scia Engineer blijkt dat voor het creëren van een tweede draagweg voor de hoekkolommen ongeveer 30% extra wapening bijgelegd dient te worden (t.o.v. de totale hoeveelheid basiswapening). Deze wapening dient voornamelijk in de randstroken van de vloeren gelegd te worden. Dit resultaat is te vinden in bijlage C.4 pagina 6.

Om een tweede draagweg te ontwerpen voor kolommen in het midden van de constructie is minder extra bijlegwapening benodigd. Deze hoeveelheid ligt in dit project op zo'n 18 %. Dit resultaat is te vinden in bijlage D pagina 5.

Wordt een wand gebruikt om een tweede draagweg te creëren, dan is een relatief verwaarloosbare hoeveelheid wapening nodig. Dit resultaat is te vinden in bijlage E pagina 8.

Uit het basismodel en uit situatie 1 blijkt dat Scia Engineer verschillende waarden geven.

Met het M-kappa diagram, bijvoorbeeld, zijn grotere zakkings te verkrijgen, maar deze waarden zijn niet erg veel groter dan wanneer er een standaard waarde voor E aangehouden wordt van 10.000 N/mm^2 . Dit is te zien vooraan bijlage C bij de analyse van resultaten van situatie 1.

Ook is gebleken dat Scia Engineer ongeveer 5% (<10%) meer wapening berekent. Echter, dit is een acceptabel verschil voor de resultaten in het verslag. Er is bij de helpdesk van Scia Engineer voor support gevraagd echter, hier is binnen de periode van dit afstudeeronderzoek nog geen antwoord op gegeven. In bijlage H.2. is de correspondentie te vinden met de vraag aan de helpdesk van Scia Engineer.

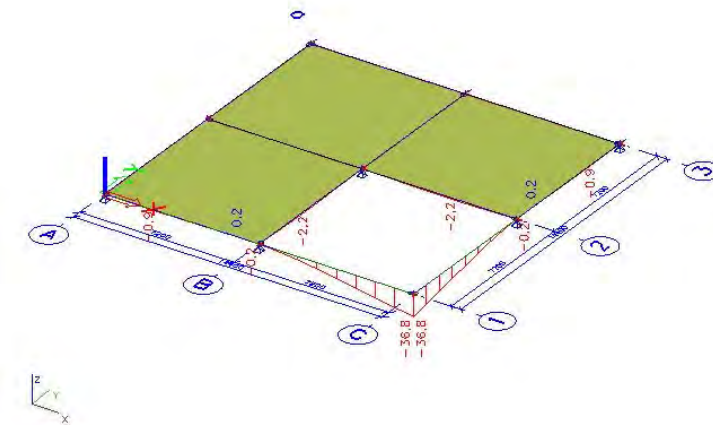
Basismodel

De stijfheidverhoudingen verschillen tussen de handberekening en Scia Engineer. Deze verschillen zijn geanalyseerd in bijlage B.3. Echter, wanneer de momenten van het vloer- en balkmodel opgeteld worden, dan zijn deze totalen wel gelijk.

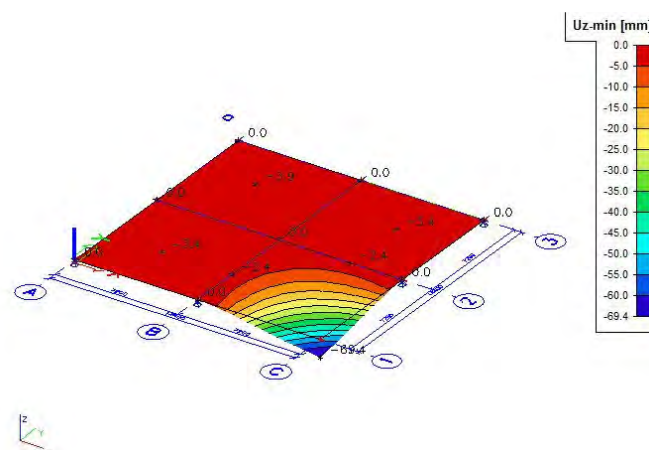
Door de afmetingen van de kolommen in te voeren in het model van Scia Engineer is ook gebleken dat de omvang van de kolommen in Scia Engineer is niet eenvoudig te bepalen is met verhoudingen van spanning (zoals zal blijken uit bijlage B.3). Wanneer de kolomafmetingen die bepaald zijn in hoofdstuk 5.3.4 in Scia Engineer ingevoerd worden, blijken de kolomzakkingen toch weer gewijzigd te zijn ten opzichte van wat je zou verwachten, namelijk dat de zakking overal gelijk is. Blijkbaar vindt er herverdeling van de belastingen plaats. De bepaling van de kolomafmetingen in Scia Engineer is te vinden in bijlage B.3. hoofdstuk 5.

Situatie 1: verwijdering hoekkolom

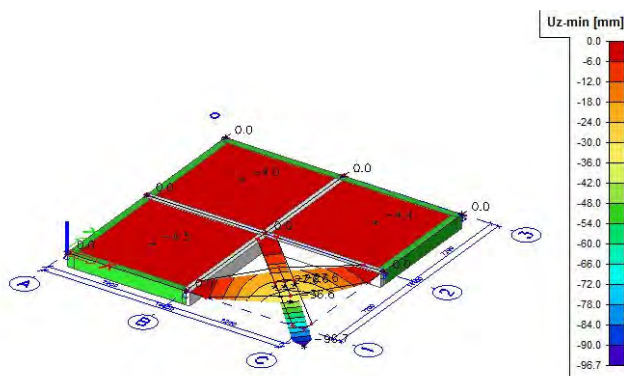
Zowel in Scia als handberekening zakt model 2 meer dan model 1 en zakt model 3 meer dan model 2. Dit betekent dat de aanname juist was en dat de modellen in de juiste volgorde, van de kleinste zakking naar de meeste zakking, zijn aangenomen. Een verslag van de analyse van deze resultaten is vooraan in bijlage C te vinden.



Figuur 7.1: Model 1, de balk zakt 37 mm



Figuur 7.2: Model 2, de balk zakt 69 mm



Figuur 7.3: Model 3, de balk zakt 97 mm

De aangenomen modellen zijn in het totaalmodel niet terug te vinden. Er zal een mix ontstaan van modellen in de praktijk. Dit is te zien en verder uitgewerkt in het verslag over de analyse van situatie 1, vooraan bijlage C. Het is te zien aan de hoeveelheden wapening dat er verschillende modellen samenwerken. Dit is te vinden in bijlagen C.1. t/m C.4. In de berekening van het totaalmodel in Scia Engineer is ook gebleken dat er een herverdeling van de belastingen uit de vloer zal ontstaan, wanneer er een hoekkolom wegvalt. De eerder aangenomen driehoeksbelasting piekt door de herverdeling na verwijdering hoekkolom bij minder dan 2,7 m. Deze resultaten zijn te vinden in het verslag voorin bijlage C en daarin bleek dat de herverdeling die zal plaatsvinden niet zo groot is als verwacht was. De piek van de driehoeksbelasting ligt nu namelijk op 2,6 meter in plaats van 2,7 meter, voor de randbalk.

Situatie 2 en 3: verwijdering middenkolom

Met een wand blijkt zeer weinig wapening nodig te zijn om een tweede draagweg te bewerkstelligen, omdat een wand gezien kan worden als een balk met een hele grote stijfheid. Dit blijkt uit bijlage E.

7.2 Hoofdconclusie

In de hoofdconclusie zal de hoofdvraag beantwoord worden, welke aan het begin van dit afstudeerproject opgesteld is. De beantwoording van de hoofdvraag vormt de hoofdconclusie van dit onderzoek.

Hoe kan bepaald worden welk ontwerp voor een tweede draagweg in de praktijk het beste is?

Om te bepalen hoe het beste een tweede draagweg ontworpen kan worden, moet een grondige analyse van het gedrag van de constructie als geheel plaatsvinden. Dit brengt echter veel moeilijkheden met zich mee; o.a. door herverdeling van de belastingen. Het in kaart brengen van het gedrag van een constructie bij een calamiteit is daarom erg complex om met handmatige modellen goed te verrichten. Dit geldt in feite al bij een eenvoudige calamiteit. Het maken van handberekeningen is echter niet nutteloos, omdat bij het maken en analyseren van de modellen wel veel inzicht in de mechanica verkregen wordt. Scia Engineer rekent met een mix van meerdere modellen en, omdat het evenwicht van de constructie als geheel altijd beschouwd wordt door Scia Engineer zal dit rekenprogramma een betrouwbare oplossing geven voor een tweede draagweg. Aan de hand van de zakkingslijnen dient gecontroleerd te worden of de gegeven zakking realistisch is.



Wanneer er een calamiteit plaatsvindt in een gebouw heeft dat gevolgen voor de overige constructie. In een normale situatie is de constructie berekend op een bepaalde belasting. Wanneer er door calamiteiten een onderdeel van de constructie wegvalt, zal de overige constructie de belasting van het weggefallen onderdeel moeten opnemen. De belasting zal dus herverdeeld moeten worden. Deze herverdeling kan met behulp van bijvoorbeeld Scia Engineer goed weergegeven worden, omdat Scia Engineer rekent met de constructie als geheel en het totale evenwicht zal waarborgen. Wanneer de calamiteit toch met de hand uitgerekend wordt, zal dat voor een beginnende constructeur als lastig ervaren worden, omdat elk constructie-onderdeel invloed heeft op andere onderdelen.

Doordat de constructie gaat samenwerken is het gedrag van de totale constructie met behulp van een 3D rekenprogramma beter inzichtelijk te maken dan met een handmatige analyse.

7.3 (Sub)conclusies

In hoofdstuk 2.2 is een aantal onderzoeksvragen opgesteld. Gedurende dit afstudeeronderzoek konden deze vragen beantwoord worden. De antwoorden op deze onderzoeksvragen vormen ook de conclusies. Deze conclusies zullen in dit hoofdstuk getrokken worden door de onderzoeksvragen te beantwoorden.

Welke mechanismen treden er op in een tweede draagwegconstructie?

In de voorstudie is er een document opgesteld met daarin allerlei verschillende mechanismen die in een ontwerp voor een tweede draagweg gebruikt kunnen worden, zie bijlage A.6. de belangrijkste en meest effectieve mechanismen die een tweede draagweg kunnen verzorgen zijn: schijfwerking, vloeilijnentheorie, momentframes en kabeltheorie.

Zijn oplossingen voor een tweede draagweg goed te vatten met modellen?

De mechanismen uit de vorige onderzoeksvraag kunnen echter beter vertaald worden naar modellen en situaties. Voor situatie 1 zijn er drie modellen opgezet en zowel met de hand als met Scia Engineer doorgerekend. Tussen de modellen die met de hand berekend zijn en de modellen die in Scia Engineer berekend zijn zitten grote verschillen. Wanneer het totaalmodel, welke berekend is met Scia Engineer, wordt vergeleken met de resultaten van de verschillende modellen blijkt dat de modellen niet gaan werken in het totaalmodel. Het totaalmodel blijkt een mix van verschillende modellen te zijn. Daarom zijn de oplossingen voor een tweede draagweg niet goed in modellen te vatten, maar kan er dus beter gekeken worden naar het gedrag van de constructie als geheel bij een specifieke situatie (bijvoorbeeld wanneer er een hoekkolom verwijderd wordt). Daarbij kan beter het rekenprogramma Scia Engineer gebruikt worden, om het totale evenwicht van de constructie te behouden en er geen voortschrijdende instorting plaatsvindt. Zie ook de analyse, vooraan bijlage C.

Welke invloed heeft een calamiteit op de belastingafdracht van een constructie?

In het basismodel is te zien dat de middenbalken ongeveer 4,5 meter per vloerveld van de vloer opnemen. Voor de randbalken is dit 2,7 meter van de vloer. In situatie 1 gaat de vloer zijn belasting herverdelen over de balken. Na de herverdeling zal de middenbalk meer belasting zal afdragen dan in de basissituatie, zie bijlage C.

Welke invloed heeft het M-kappa diagram op de bepaling van de uiteindelijke zakking?

De E-modulus van het beton wordt in de Scia Engineer berekening vermenigvuldigd met een factor om modellen met elkaar te kunnen vergelijken. Deze factor is bepaald aan de hand van de gemiddelde E-modulus uit de handberekening (met gebruikt te hebben gemaakt van het M-kappa



diagram). Er bleek hieruit dat de verlaging van de werkelijke waarde van de E-modulus de zakking in Scia Engineer maximaal met 30 mm verhoogd kon worden. Deze 30 mm is maar zeer klein ten opzichte van het verschil van 315 mm tussen Scia Engineer en de handberekening, dus de invloed van het M-kappa diagram is maar zeer klein. Informatie hierover is te vinden in bijlage C.

Wat zijn de verschillen tussen een handberekening en een berekening met Scia Engineer en hoe zijn deze te verklaren?

In het totaalmodel van situatie 1 wordt de reservecapaciteit volledig uitgenut. In de handberekening is hiermee slechts beperkt rekening gehouden, maar Scia Engineer heeft deze reservecapaciteit wel volledig uitgenut. Dit is te vinden in bijlage C.

In de berekening van het basismodel bleek dat de stijfheidverhoudingen verschillen tussen de handberekening en Scia Engineer, doordat in de momentweergave in Scia Engineer geen rekening is gehouden met de zijstukken van de T-vorm van de balk. Dit heeft te maken met de meewerkende breedte. Dit is te vinden in het verslag over stijfheidverhoudingen in bijlage B.3.

Hoe is tweede draagweg in een praktische situatie het efficiëntst te bepalen?

Een tweede draagweg kan het veiligste via verplaatsingen worden bepaald. Op die manier kan gecontroleerd worden of een element niet in aanraking komt met onderliggende elementen. En omdat die verplaatsing invloed heeft op de rek van het staal zou gecontroleerd moeten worden of het staal niet knapt bij een zekere verplaatsing.

Hieronder volgen nog een aantal conclusies die gebleken zijn uit het onderzoek, maar waarover geen onderzoeksvraag gesteld is.

- In een reëel ontwerp is de maatvoering van kolommen praktischer, dus zullen de kolomzakkingen verschillen en zal de constructie ander gedrag vertonen. Zie ook bijlage B.3.
- In Scia Engineer is het constructief gedrag van het constructiemodel betrouwbaar. Dit volgt uit het stijfheidverslag in bijlage B.3.
- De balk blijkt in het onderzoeksmodel bij verwijderen van een hoekkolom niet te bezwijken. Dit is bewezen in bijlage C.1 t/m C.4.
- In situatie 2 (wegvallen middenkolom) gedragen balken zich stijver dan vloer. Daardoor komt er meer wapening in de balken. Meer hierover is te vinden in bijlage D.
- Met een wand is het eenvoudig om een tweede draagweg te bewerkstelligen, omdat de wand een veel grotere stijfheid heeft dan een balk uit situatie 1. Dit blijkt uit bijlage E.



8. Leermomenten en aanbevelingen

Gedurende het verloop van dit afstudeerproject hebben wij ervaren dat het onderwerp 'tweede draagweg in de praktijk' een erg complex onderwerp is voor een HTS'er, die nog niet veel ervaring heeft kunnen opdoen. Ook voor beginnende constructeurs zal het een lastig onderwerp zijn, omdat het ook hen vaak ontbreekt aan ervaring. Daarom is er besloten een hoofdstuk in het hoofdverslag te wijden aan de leermomenten die wij hadden tijdens ons afstuderen. Deze leermomenten hebben ons veel geleerd en een HTS'er of een beginnend constructeur kan uit deze leermomenten weer hun voordeel halen, zodat er niet steeds dezelfde fouten gemaakt hoeven worden. Zie ook bijlage F.1 en F.2.

Leermomenten

Ten eerste is het een belangrijk leermoment geweest om een eenvoudig gebouw op te zetten en deze zowel met de hand als met Scia Engineer helemaal door te rekenen. Hiervoor hadden we twee weken ingepland en uiteindelijk zijn we er ongeveer zes weken mee bezig geweest, omdat we telkens weer verschillen tegenkwamen tussen de handberekening en de berekening met Scia Engineer. Hieronder zullen de belangrijkste leermomenten genoemd worden afkomstig uit de periode van de berekening van het basismodel:

- **Stijfheidsverhoudingen met handberekening en kolomstrook (zie ook bijlage B.1 en B.3):**

In de handberekening hadden we bepaald dat de balken geen starre ondersteuning vormen voor de vloer. Dit heeft als gevolg dat de balken niet alle belasting afdragen naar de kolommen, maar dat er stroken in de vloer gaan meewerken met de balk. Deze stroken heten kolomstroken en zullen gewapend worden als een balk. Om te bepalen hoeveel belasting er via de balk afgedragen wordt en hoeveel belasting er via de kolomstrook afgedragen wordt naar de kolommen hebben wij de balk en de vloerstrook apart ingevoerd in Technosoft. Vervolgens hebben we 100% belasting op de balk en 100% belasting op de kolomstrook gezet. De logische conclusie was dat de kolomstrook meer zou gaan zakken (omdat deze hoogte (stijfheid) veel kleiner is) en de verhoudingen hadden we bepaald voor de handberekening (zie ook hoofdstuk 5.3.3 'bepaling stijfheidsverhouding').

Met Scia Engineer hadden we hetzelfde gedaan, maar dan niet aan de hand van de zakking, maar aan de hand van de momenten. We dachten dat we de stijfheidsverhoudingen nu hadden bepaald, maar er bleek nog een verschil te zitten in de handberekening en de berekening met Scia Engineer. In de handberekening kwamen we op een gemiddeld percentage dat naar de balken afgedragen wordt van 83% en uit de berekening met Scia Engineer bleek dit gemiddeld 70%.

We wilden graag weten waar dit verschil vandaan kon komen en dit bleek nog een heel karwei te zijn. We kwamen er onder andere achter dat Scia Engineer niet dezelfde momenten weergeeft in de balk als bijvoorbeeld Technosoft. We verwijzen hiervoor naar het verslag over de berekening van de stijfheidsverhouding vooraan bijlage B.3. Dit is niet in enkele regels uit te leggen, maar is desalniettemin een erg belangrijk leermoment geweest.

- **Zakking kolommen (zie ook bijlage B):**

We hadden de kolommen eerst op basis van de slankheids eis bepaald, maar toen we deze afmetingen invoerden in het model in Scia Engineer, bleek dat de momenten in de vloeren anders verliepen dan in de handberekening. Dit verschil in momenten was het gevolg van de verschillende spanningen die in de kolommen optreden. Doordat elke kolom een andere spanning had, had ook elke kolom een andere zakking en kon er dus niet meer aangenomen worden dat de vloer star ondersteund is (dit kan wel als alle kolommen dezelfde zakking hebben). Om toch een zuiver model te krijgen hebben we de kolommen aangepast, zodat in alle kolommen dezelfde spanning zou optreden. Na deze aanpassing blijkt relatief meer belasting naar de hoekkolom te gaan.



Toen het basismodel doorgerekend was, is er begonnen met de situatie waarbij er een kolom wegvalt. Er is voor gekozen om te beginnen met het laten wegvallen van een hoekkolom, omdat ons dat de meest uitdagende variant leek waar we meteen allerlei soorten problemen tegen zouden komen. In overleg met de afstudeerbegeleider zijn er voor deze situatie 3 modellen opgezet en doorgerekend.

- **Er zijn verschillen tussen Scia Engineer en de handberekening (zie ook bijlage C.1 t/m C.4):**

We hebben gemerkt dat de resultaten uit de handberekening niet overeenkwamen met de resultaten van de berekening met Scia Engineer. Bijvoorbeeld de zakking is in de modellen in Scia Engineer veel lager dan in de modellen uit de handberekening. Als er bijvoorbeeld gekeken wordt naar het werkelijke verloop van EI, dan zie je een grotere zakking in de handberekening, in verband met de verandering van de stijfheid als gerekend wordt met het M-Kappa diagram. Daarom zou de aanname van $E=10.000 \text{ N/mm}^2$ in Scia Engineer afhankelijk moeten zijn van het model en zou er een gemiddelde waarde aangehouden kunnen worden om de uitvoer uit Scia Engineer meer overeen te laten komen met de handberekening. Of er kan aan het eind van de berekening een factor toegepast worden die is gebaseerd op het basismodel, om de berekening met Scia Engineer meer overeen te laten komen met de handberekening. Nadat deze factor toegepast was op de zakkingen uit Scia Engineer bleek echter dat het verschil nog steeds erg groot was, maar toe zijn we erachter gekomen dat er bij een aantal modellen een foute schematisering was aangehouden, zie vooraan bijlage C.

- **In model 1 treedt er, zoals nu is ingevoerd in Scia Engineer ook herverdeling op (zie ook het verslag over analyse van de resultaten in bijlage C).**

Vanwege het feit dat in model 1 in de Scia Engineer berekening één vloerveld is verwijderd, omdat op die manier bekeken kon worden welke extra wapening er nodig was in alleen de balk, zal er bij de berekening van Scia Engineer ook een herverdeling van de belastingen optreden. In de handberekening is er geen rekening gehouden met deze herverdeling omdat de vloer dan nog aanwezig is. Bovendien zal de vloer in de praktijk ook nog aanwezig zijn wanneer de balk het extra moment opneemt en is het model in Scia Engineer dus niet realistisch. In de analyse van model 1 van situatie 1 (bijlage C) is op dit leermoment nog verder ingegaan.

- **Het echte gedrag van de constructie is een mix van de modellen (zie ook het verslag over analyse van de resultaten in bijlage C):**

Toen we de modellen met de hand uitgerekend hadden, bleek dat wanneer we in het totaalmodel in Scia Engineer een hoekkolom verwijderden, er geen afzonderlijk model van de aangenomen modellen terug te vinden was in het totaalmodel. Dit kan te verklaren zijn doordat Scia Engineer geen rekening houdt met modellen, maar de constructie als geheel ziet. Er zal dus herverdeling plaats vinden in het totaalmodel, waarbij in alle elementen de reservecapaciteit geheel uitgenut wordt. Indien er dan nog extra wapening nodig is, om voortschrijdende instorting te voorkomen, zal Scia Engineer de (rest van de) vloer waarschijnlijk als een grote uitkraging beschouwen en dit (herverdeelde) model is naar onze verwachting te vergelijken met een mix van modellen die met zo min mogelijk bijlegwapening zal zorgen voor een tweede draagweg.

Aanbevelingen

Een beginnend constructeur kan het best een ontwerp voor een tweede draagweg maken aan de hand van Scia Engineer of een vergelijkbaar rekenprogramma. Op deze manier kan een beter beeld verkregen worden van het gedrag van de gehele constructie en kan het verloop van de herverdeling beter ingeschat worden.



Voordat wordt begonnen met de ontwerpen van een tweede draagweg wordt het bovendien aanbevolen om de basisconstructie, dus de UGT, goed inzichtelijk te hebben. Zo kunnen de verschillen tussen de basissituatie en bij calamiteiten snel opgemerkt worden en kan op een effectieve manier bepaald worden welke extra maatregelen er nodig zijn om de calamiteit op te vangen.

9. Nabeschuiving

Toen we begonnen met het opstarten van het project hadden we het idee opgevat om meerdere bouwtypen te analyseren. We besloten dit te doen op volgorde van relevantie voor een tweede draagweg, te beginnen met het meest relevante bouwtype: in het werk gestort beton. Vervolgens stond op de planning het onderzoeken van een prefab betonnen constructie en daarna een constructie met staal. Voor ieder bouwtype was het de bedoeling om te rekenen aan constructies zowel met kolommen op de bovenverdieping als zonder kolommen maar met wanden op de bovenverdieping. Daarnaast was het de bedoeling om voor al deze verschillende constructies meerdere calamiteiten te beschouwen. Dit houdt in dat we de verwijdering van alle kolommen in de constructie achtereenvolgens wilden beschouwen. De bedoeling was in deze fase het onderzoek zo op te zetten dat voor iedere situatie berekend kon worden wat het meest efficiënte ontwerp is voor een tweede draagweg.

Nadat het basismodel opgezet was, werd begonnen met het ontwerpen van een tweede draagweg. De situatie waarvoor dat gedaan werd was die waarbij een hoekkolom verwijderd is; in dit verslag 'situatie 1' genoemd. Tijdens deze stap werd duidelijk dat er meerdere manieren zijn om een tweede draagweg op te zetten. Er werden namelijk modellen opgezet en voor elk model werd de werking uitgezocht, deze fase was erg leerzaam, omdat hier erg veel mechanica om de hoek kwam kijken en alle schoolboeken van het vak mechanica zijn hierbij gebruikt als naslagwerk. Hierdoor is de mechanica uit bijna alle voorgaande courses weer aan bod gekomen voor ons onderzoek.

Bij situatie 1 bleek echter direct dat de modellering complex werd. Er kwamen allerlei aspecten aan de orde die op de HTS niet behandeld worden, maar verder gaan. Deze stof wordt pas behandeld bij vervolgoopleidingen tot constructeur. Door deze onvoorziene stap in het onderzoek werd duidelijk dat het proces niet meer volgens de initiële planning zou kunnen verlopen. We wilden erg graag meer te weten komen over de nieuwe stof en daarom werd besloten het onderzoek te beperken tot alleen (in het werk gestorte) betonconstructies en de calamiteiten in de volgende situaties slechts te berekenen met Scia Engineer.

Besloten was, om bij de volgende stap, de calamiteit met een verwijderde middenkolom, alleen verder te gaan rekenen met het model in Scia Engineer, omdat de resultaten dan dichterbij de werkelijkheid zouden komen. Steeds werd geprobeerd inzichtelijk te maken hoeveel extra wapening er nodig is voor de toepassing van een tweede draagweg en welke vervorming daarbij hoorde.

Doordat er weinig tijd over bleef, is er besloten om nog één andere calamiteit te beschouwen. Er is gekozen om verder te gaan met een betonconstructie met drie wanden op de verdieping.

Doordat onze ervaring met het Scia Engineer beperkt was, bleek het modelleren daarmee de nodige tijd te kosten. In bijlage F.2 is een overzicht geplaatst van enkele problemen die zich tijdens het werken met Scia Engineer voordeden. Enkele van deze problemen werden opgelost door vragen te



stellen aan collega's of aan de helpdesk van Scia Engineer. Door deze problemen op te lossen is er erg veel ervaring opgedaan met Scia Engineer.

In bijlage H.1 en H.2 zijn notulen en relevante E-mailcontacten weergegeven. Deze documenten schetsen een goed inzicht in het verloop van het onderzoek. Ook de planning, welke in bijlage G.2 te vinden is, geeft een goed beeld van het verloop van dit onderzoek.



Literatuurlijst

Dr. ir. drs. C.R. Braam en ir. P. Lagendijk (Cement en beton), (2010), *Constructieer Gewapend beton (6^e druk)*

NEN-EN 1990: (2002) + Nationale Bijlagen (2007) *Grondslagen van het constructief ontwerp*.

NEN-EN 1991-1-7: (2006) + Nationale Bijlagen (2007) *'Buitengewone belastingen: stootbelastingen en ontploffingen'*, het Nederlands Normalisatie-instituut

NEN-EN 1992-1-1: (2005) + Nationale Bijlagen (2007) *Ontwerp en berekening van betonconstructies - Deel 1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen*.

NEN 6720, (1995), TGB 1990 *'Voorschriften Beton Constructieve eisen en rekenmethoden'*, het Nederlands Normalisatie-instituut.

NEN 6702, (2001), TGB 1990 *'Belastingen en vervormingen'*, het Nederlands Normalisatie-instituut

Bouwbesluit, (2003), ministerie van VROM

Stufib studiecél 2, studievereniging fib – Nederland, (2006), *Stufib-rapport 8 'Constructieve samenhang van bouwconstructies'*.

Kees van der Zijden, (Hogeschool van Arnhem en Nijmegen), *Syllabusnummer 1213, Betonconstructies 1*

Kees van der Zijden, (Hogeschool van Arnhem en Nijmegen), *Syllabusnummer 1211, Betonconstructies 2*

Kees van der Zijden, (Hogeschool van Arnhem en Nijmegen), *Syllabusnummer 1212, Mechanica voor de Minor Creatief Construeren*

Simon Bolle, (TU Delft), (2009), *Progressive collapse indicator*

Jeroen Coenders en Leo Wagemans, (2005), *Proposal for a Quick Building Assessment Tool for Progressive Collapse*



Geraadpleegde websites

Foto Ronan Point, van Wikipedia: Image taken from "London Over the Border" [1], a historical website produced by the London Borough of Newham. Image is credited to The Daily Telegraph, 1968.

Afbeelding Tuned mass Damper:

http://en.wikipedia.org/wiki/File:Taipei_101_Tuned_Mass_Damper.png