



Projecttitel: **Het kloppend hart**

Datum: **31-05-2018**

Instituut: **BVBMS**

Afstudeerrichting: **Betonconstructies**

Student

Naam: **Lex Meijer**

Studentnummer: **156541**

Adres: **Prunusstraat 56
9741LE Groningen**

Telefoonnummer: **06-13 76 19 82**

Afstudeerbegeleider

Naam: **Ing. J.H.M.(Hans) Tuinte RO**
Bedrijf: **Lucassen bouwconstructies**
Functie: **Constructief ontwerper**

Voorwoord

Voor u ligt een rapport waarin ik het onderzoek beschrijf dat ik heb uitgevoerd ter completering van mijn opleiding betonconstructeur MSENG. Dit is het laatste onderdeel van een driejarige opleiding.

Vanuit mijn passie voor het milieu en duurzaamheid heb ik, naast het onderzoek naar mogelijke constructievormen voor een gebouw ook nadrukkelijk gekeken naar de maatschappelijke invloed van de oplossingen. Hierin is met name gekeken naar de CO₂ emissie van de te gebruiken materialen. CO₂ emissie verminderen tegen een gelijke of zelfs lagere kostprijs, dat willen we toch allemaal?

Naast het onderzoeken en afwegen van varianten, met betrekking tot CO₂, kosten en uitvoeringsaspecten mag het technische aspect natuurlijk niet ontbreken. In de uitwerking van een definitieve variant wordt hier uitgebreid op ingegaan.

Oorspronkelijk was de onderzoeksvraag meer algemeen, waarbij constructieve ontwerpen zouden worden afgewogen door middel van een multi-criteria-analyse. Bij een multi-criteria-analyse wordt een groot aantal aspecten meegenomen en is de waardering per aspect erg van belang. Door het ontbreken van een duidelijke opdrachtgever en de passie voor duurzaamheid zijn, gedurende het onderzoek, de aspecten “duurzaamheid en maatschappelijke verantwoordelijkheid ” meer naar voren gekomen.

In het bijzonder wil ik Hans Tuinte bedanken voor zijn, prettige, flexibele en progressieve ondersteuning. Daarnaast wil ik Geert van Oost, Peter Oudshoorn, Lonneke van Haalen en Koos ten Berge bedanken voor de ondersteuning vanuit de praktijk.

Samenvatting

De bouw is een vrij traditionele sector, waarin veranderingen langzaam worden doorgevoerd. Constructieve ontwerpen worden al jaren op dezelfde wijze uitgevoerd en worden veelal gestuurd op kosten. In tijden waarin duurzaamheid steeds meer voorop komt te staan, rijst de vraag op wat nou eigenlijk de maatschappelijke invloed is van onze traditionele constructie ontwerpen.

Het doel van dit onderzoek is de maatschappelijke invloed te achterhalen. Hiervoor is de volgende onderzoeksvraag geformuleerd: *Op welke wijze beïnvloedt onze traditionele manier van constructief ontwerpen onze maatschappij, voor het project aan het Doeleplein te Leeuwarden?* De invloed op de maatschappij is hierbij de CO₂ emissie van verschillende typen constructies.

Om antwoord te kunnen geven op deze vraag is eerst een voorstudie verricht door middel van interviews, waarnaast ook een literatuurstudie is uitgevoerd. Vervolgens is, voor het project aan het Doeleplein in Leeuwarden, voor belangrijke onderdelen een variantenstudie opgesteld naar verschillende bouw- en uitvoeringssystemen.

Op basis van de resultaten van de variantenstudie blijkt dat de maatschappelijke invloed van constructies groot is en dat in de ontwerpfase hierop gestuurd kan worden. De relatieve invloed is het grootst bij de keuze van vloer en wandsystemen, omdat deze het meeste materiaal betreffen voor een geheel gebouw. Bij de keuze van een optimaal duurzaam vloer- en wandstelsysteem kan, door de besparing op CO₂ emissie aan het Doeleplein, een auto 7 keer de wereld rond. Met de komst van elektrische auto's zullen dergelijke verhoudingen alleen maar toenemen en mag de invloed dus absoluut niet onderschat worden.

Naast het ontwerpen en afwegen van varianten is ook de technische kennis, die vergaard is tijdens de opleiding, toegepast in de uitwerking van een definitieve variant. Hierbij is gezocht naar een zo duurzaam mogelijke stabiliteitskern van beton en is een prefab boogconstructie uitgewerkt.

Vervolgonderzoek en materiaal optimalisatie is voor dit onderzoek zeker aan te raden. In de ontwerpfase van een project kan de grootste winst behaald worden op het gebied van CO₂ emissie en kosten, maar in de definitieve uitwerking en materiaal optimalisering kan ongetwijfeld nog meer winst worden behaald.

Inhoudsopgave

VOORWOORD	2
SAMENVATTING.....	3
1 INLEIDING	6
1.1 OPBOUW RAPPORT	6
1.2 PROJECTOMSCHRIJVING	6
1.2.1 <i>Project locatie en achtergrond</i>	6
1.2.2 <i>Motivering onderwerp</i>	6
1.2.3 <i>Onderzoeksvraag</i>	7
1.2.4 <i>Plan van aanpak</i>	7
1.3 UITGANGSPUNTEN	7
2 VOORSTUDIE	8
3 VARIANTENSTUDIES	9
3.1 OPZET VARIANTENSTUDIES	9
3.1.1 <i>Ontwerpfilosofie</i>	9
3.1.2 <i>Knelpunten</i>	10
3.1.3 <i>Optimalisatie</i>	11
3.2 APPARTEMENTEN	11
3.2.1 <i>Stabiliteit</i>	12
3.2.2 <i>Vloersystemen</i>	13
3.2.3 <i>Knelpunten en conclusie vloersystemen</i>	16
3.2.4 <i>Bouwsystematiek</i>	17
3.2.5 <i>Conclusie appartementen</i>	24
3.3 OVERGANGSCONSTRUCTIE A, VAN APPARTEMENTEN NAAR RESTAURANT	25
3.3.1 <i>Kolommenstructuur</i>	25
3.3.2 <i>Penanten</i>	28
3.3.3 <i>V- en K-kolommen</i>	29
3.3.4 <i>Knelpunt overgang met naar binnen staande kolommen</i>	31
3.3.5 <i>Conclusie</i>	32
3.4 OVERGANGSCONSTRUCTIE B, VAN RESTAURANT NAAR PARKEERGARAGE	33
3.4.1 <i>Massieve betonvloer</i>	33
3.4.2 <i>Balkenraster beton</i>	35
3.4.3 <i>Balkenraster staal</i>	36
3.4.4 <i>Balkenraster staal-beton</i>	37
3.4.5 <i>Staal vakwerk</i>	38
3.4.6 <i>Knelpunten en conclusie</i>	39
3.5 CONCLUSIE ONTWERPTRAJECT	40
4 UITWERKING DEFINITIEVE VARIANT	41
4.1 BOOGCONSTRUCTIE	41
4.1.1 <i>Schatting dimensies en vervormingen</i>	41
4.1.2 <i>Uitgangspunten en randvoorwaarden</i>	42
4.1.3 <i>Boogvorm en vrije ruimte</i>	44
4.1.4 <i>Berekening</i>	46
4.1.5 <i>Detaillering</i>	50
4.2 STABILITEITSKERN	52
4.2.1 <i>Uitgangspunten</i>	52

4.2.2	Berekening.....	53
5	CONCLUSIE	58
6	REFLECTIE	59
7	DISCUSSIE EN AANBEVELINGEN	60
8	TERMEN EN AFKORTINGEN	61
9	BIBLIOGRAFIE	61
	BIJLAGE A: IMPRESSIE ARCHITECT	62
	BIJLAGE B: PLATTEGRONDEN EN DOORSNEDE ARCHITECT	63
	BIJLAGE C: LITERATUURSTUDIE.....	64
	BIJLAGE D: PRAKTIJKONDERZOEK.....	87
	BIJLAGE E: ACHTERGROND KOSTEN.....	107
	BIJLAGE F: ACHTERGROND CO ₂ EMISSIE BETON	127
	BIJLAGE G: ACHTERGROND GEBRUIKTE FORMULES EN SPREADSHEETS	128
	BIJLAGE H: INVOER REKENSOFTWARE.....	142
	BIJLAGE I: TECHNOSOFT IN- EN UITVOER.....	143
	BIJLAGE J: PLAN VAN AANPAK	148

1 Inleiding

Voor de master opleiding betonconstructeur van de betonvereniging dient een afstudeeronderzoek te worden verricht. In het onderzoek dienen met name ontwerpaspecten te worden belicht. Tevens dient de technische kennis die men heeft opgedaan in de opleiding naar voren te komen. Allereerst moet een variantenstudie worden verricht, waarbij gebruik wordt gemaakt van gegevens verzameld in het vooronderzoek. Uit de variantenstudie moet blijken dat de student verschillende bouwsystemen kan beoordelen op basis van vooraf gestelde beoordelingscriteria. Bij de variantenstudie in dit onderzoek wordt met name gekeken naar de kosten en CO₂ emissie van verschillende constructieve uitvoeringsmethodieken en materialisering. In de uitwerking van de definitieve variant wordt de opgedane kennis gedurende de opleiding op praktische en theoretische wijze toegepast.

1.1 Opbouw rapport

In dit document wordt een onderzoek beschreven waarbij verschillende ontwerpen op bovenstaande criteria worden getoetst.

In hoofdstuk 1.2 van dit rapport wordt eerst de keuze en motivering van het onderwerp nader belicht. Daarop volgt een onderzoeksvraag met bijbehorende deelvragen en een projectomschrijving. In hoofdstuk 2 wordt beschreven op welke wijze de voorstudie is verricht, die met name is opgenomen in de bijlagen. In hoofdstuk 3 wordt de variantenstudie behandeld, waarna in hoofdstuk 4 de definitief gekozen variant wordt uitgewerkt. Tot slot wordt het document afgesloten met een conclusie en reflectie.

1.2 Projectomschrijving

1.2.1 Project locatie en achtergrond

Het betreft een ontwerp voor een gebouw aan het Doeplein te Leeuwarden van “de unie architecten”. Het is een inzending voor de manifestatie Kloppend Hart in Leeuwarden ten behoeve van het revitaliseren van delen van de binnenstad van Leeuwarden. Op dit moment is het een ongedefinieerde ruimte met enkel een aantal parkeerplekken. Dit mist levendigheid. Het ontwerp betreft meer dan enkel een gebouw, maar voor dit afstudeeronderzoek wordt enkel het hoofdgebouw gebruikt als is verduidelijkt in Figuur 1.



Figuur 1: Stedenbouwkundige inpassing

Het bouwblok bevat 3 onderdelen. De beganegrond en de eerste verdieping zijn beschikbaar voor een parkeergarage. De “tussenlaag”, ook wel 2e verdieping, is een opengewerkte verdieping. Deze opengewerkte verdieping kan gebruikt worden als restaurant met terras. De lagen daarboven worden uitgevoerd als appartementen.

1.2.2 Motivering onderwerp

Het is algemeen bekend dat bouwprojecten en constructies voor een groot deel verantwoordelijk zijn voor de CO₂ emissie in de wereld. Waar dit voorheen nog geaccepteerd werd, lijkt nu de vraag van de maatschappij te veranderen. In de traditionele manier van ontwerpen worden duurzaamheidsaspecten in de constructie niet of nauwelijks meegenomen. Wel wordt er op allerlei andere aspecten als gebruiksfase en leefbaarheid gestuurd. Omdat het voor jonge- en oude constructeurs lastig is de vinger op de zere plek te leggen, wil ik proberen hierin een basis te leggen voor mezelf en collega constructeurs. Omdat duurzaamheid in de constructiewe-

reld nog niet breed gedragen is, mag de oorspronkelijke drijfveer achter de constructieve ontwerpen absoluut niet ontbreken: geld. Deze 2 onderdelen, kosten en duurzaamheid leiden tot een voor mij interessante en uitdagende onderzoeksvraag.

1.2.3 Onderzoeksvraag

De verschillende bestemmingsdoeleinden en de motivatie met betrekking tot duurzaamheid leiden tot een interessant onderzoek voor dit gebouw met de volgende vraagstelling:

- Op welke wijze beïnvloedt onze traditionele manier van constructief ontwerpen onze maatschappij, voor het project aan het Doeplein te Leeuwarden?

Deze hoofdvraag zal beantwoord worden door onderstaande deelvragen:

- Op welke wijze wordt er nu rekening gehouden met de maatschappelijke invloed?
- Wat zijn de kosten van traditionele constructieve ontwerpen?
- Welke CO₂ emissie hebben de traditionele constructieve ontwerpen?
- Welke invloed m.b.t. duurzaamheid en kosten kan worden uitgeoefend in de ontwerpfase van een project?

1.2.4 Plan van aanpak

Het plan van aanpak dat als leidraad diende voor het onderzoek en is overeengekomen met afstudeerbegeleider Hans Tuinte, is opgenomen in Bijlage J: Plan van aanpak.

1.3 Uitgangspunten

De uitwerking van het project beperkt zich uitsluitend tot de in het plan van aanpak benoemde onderdelen. Het behelst enkel de hoofddraagconstructie van het hoofdgebouw. In de uitwerking van dit project wordt enkel voor de overgangsconstructie rekening gehouden met een parkeergarage.

Voor een gedegen vergelijk en een overzichtelijke uitwerking worden op voorhand de uitgangspunten vastgesteld. De volgende uitgangspunten worden gehanteerd.

Ontwerplevensduur: De ontwerplevensduur van het gebouw bedraagt 50 jaar, op basis van tabel [NB.1-2.1 van EN 1990](#), indelingscategorie klasse 3;

OntwerpClassificatie	Eurocode 2	categorie	Korte omschrijving
Betrouwbaarheidsklasse	Tabel B2	RC2	
Gevolgklasse	Tabel B1	CC2	Middelmatige gevolgen ten aanzien van het verlies van mensenlevens, en/of aanzienlijke economische of sociale gevolgen of gevolgen voor de omgeving.

Verticale belastingen

Tijdens het ontwerp worden bij verschillende functies de onderstaande belastingen gehanteerd. Dit is een vierkante meter belasting in kilo Newton(kN), inclusief scheidingswanden.

Functie	Blijvende belasting	Opgelegde belasting	Omhullend	Brand	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Woningen	7	2,6	12,2	7,8	0,4	0,5	0,3
Restaurant	9	6	19,8	12,6	0,6	0,7	0,6
Parkeergarage	8	3,5	14,9	10,1	0,7	0,7	0,6

Brandwerendheid

Conform het [Bouwbesluit 2012, paragraaf 2.2.1, artikel 2.10](#): De hoogte van de brandwerendheidseis voor de hoofddraagconstructie is afhankelijk van de functie van het gebouw en het niveau waarop zich de hoogste vloer van een verblijfsgebied zich in het gebouw bevindt. De vloeren op de hoogste verdiepingen hebben een woonfunctie en dus bevinden zich vloeren met een verblijfsgebied hoger dan 13m boven het meetniveau. Voor deze vloeren, en dus voor de hele onderliggende constructie, geldt een brandwerendheidseis van 120 minuten. Bij een woonfunctie mag hier niet van afgeweken worden middels een vuurlastberekening indien er vloeren boven 7m van het meetniveau aanwezig zijn. Daarnaast wordt de eis voor de brandwerendheid bepaald door de eis om compartimentsgrenzen minimaal 60 minuten in stand te houden. Voor de vluchtwegen geldt een vaste eis van 30 minuten.

Geluidwering

Volgens tabel 3.15 van het Bouwbesluit geldt voor de wanden en vloeren tussen woningen op één perceel (artikel 3.17.3) een grenswaarde van 54 decibel. Bij verschillende functies op één perceel en voor een bijeenkomstfunctie (restaurant) geldt een eis van 59 decibel (artikel 3.17.4).

Bouwkundige invulling

De dimensionering, detaillering en bevestiging van bouwkundige elementen (als gevelbekledingen, puien, trappen, etc.) is geen zaak voor een constructeur en valt dus buiten de scope van dit afstudeeronderzoek.

Materialen

- ter plaatse gestort beton C30/37;
- geprefabriceerd beton C55/67;
- constructiestaal S460 en S355.

2 Voorstudie

In het kader van voorstudie is op verschillende wijzen onderzoek gedaan naar meer informatie over het gestelde onderwerp. Allereerst is er een literatuurstudie verricht naar de mogelijke toe te passen varianten op het gebied van:

- bouwsystemen/hoofddraagstructuur;
- vloersystemen;
- wandsystemen.

De aandachtspunten bij deze studie waren duurzaamheid, kosten, uitvoeringstechniek en gebruikersaspecten. Daarnaast is een aparte studie gedaan naar duurzaamheid en CO₂ emissie. De literatuurstudie is in zijn geheel opgenomen in Bijlage C: Literatuurstudie.

Naast een literatuurstudie is er ook onderzoek naar het werkveld verricht. Dit onderzoek is uitgevoerd door middel van interviews, bedrijfsbezoeken en analyse van referentieprojecten. De uitwerking van deze 3 onderdelen is opgenomen in Bijlage D: Praktijkonderzoek

Voor de kosten van verschillende onderdelen is gebruik gemaakt van 2 websites te weten:

- <http://www.bouwkosten.nl/>;
- <https://bouwkosten.bouwformatie.nl/>.

Van deze websites is in november en december van 2017 allerlei informatie gehaald die is gebundeld in Bijlage E: Achtergrond kosten. Daar waar directe kosten niet herleidbaar waren is gebruik gemaakt van lineaire interpolatie.

3 Variantenstudies

In dit hoofdstuk worden de verschillende variantenstudies uitgewerkt. In de variantenstudies wordt middels handberekeningen en analyses constructieve afmetingen vastgesteld waarna de kosten en CO₂ emissie van de verschillende constructieve elementen wordt bepaald. Tevens worden de voor- en nadelen van verschillende varianten beschouwd. Voor deze variantenstudies worden de volgende uitgangspunten gehanteerd:

<i>Uitgangspunten</i>			
Materiaal	Kosten in euro		CO₂ emissie in kg
Staal S355	1,3	€/kg	480 kg/ton
Staal S460	1,6	€/kg	480 kg/ton
Aanbrengen HEA240-320 S235	1,6	€/kg	480 kg/ton
Aanbrengen HEA240-320 S460	1,9	€/kg	480 kg/ton
Aanbrengen HEA340-400 S235	1,6	€/kg	480 kg/ton
Aanbrengen HEA340-400 S460	1,9	€/kg	480 kg/ton
Aanbrengen SFB liggers	2,5	€/kg	480 kg/ton
Beton C30/37	100	€/m ³	variabel kg/m ³
Beton C55/67	150	€/m ³	variabel kg/m ³
Wapening fyk 500N/mm ²	1,15	€/kg	1650 kg/ton
Kalkzandsteen d=300	133	€/m ²	75 kg/m ³
Brandwerende bekleding 30min	35	€/m ²	19 kg/m ²
Brandwerende bekleding 60min	58	€/m ²	29 kg/m ²
Brandwerende bekleding 90min	70	€/m ²	37 kg/m ²
Brandwerende bekleding 120min	90	€/m ²	48 kg/m ²

Voor kosten en CO₂ emissie per element en verdere achtergrondinformatie zie Bijlage E: Achtergrond kosten en Bijlage F: Achtergrond CO₂ emissie beton.

3.1 Opzet variantenstudies

Doordat het gebouw in 3 verschillende delen en functies opgedeeld is, wordt ook de variantenstudie van de 3 onderdelen apart behandeld. Naast de 3 functies is er ook een aantal knelpunten waarop bij de variantenstudie dient te worden gelet. In deze paragraaf worden de ontwerpfilosofie alsmede de knel- en aandachtspunten beschreven.

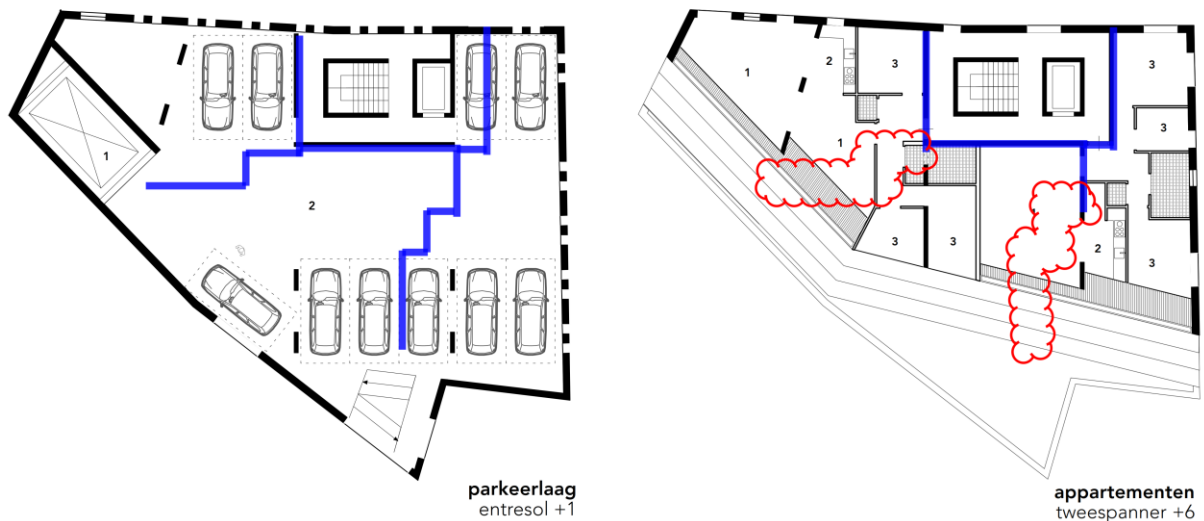
3.1.1 Ontwerpfilosofie

Voor de constructie is het van belang dat de verticale dragende lijnen zo veel mogelijk boven elkaar staan. Daarom is een juiste afstemming met de verschillende bestemmingsdoeleinden zeer van belang. Onderstaand wordt de ontwerpfilosofie van de verticale dragende elementen verder verduidelijkt. Als eerste wordt gekeken naar de woningscheidende wanden in de meest voorkomende appartementen zoals met de blauwe lijnen weergegeven in Figuur 2.



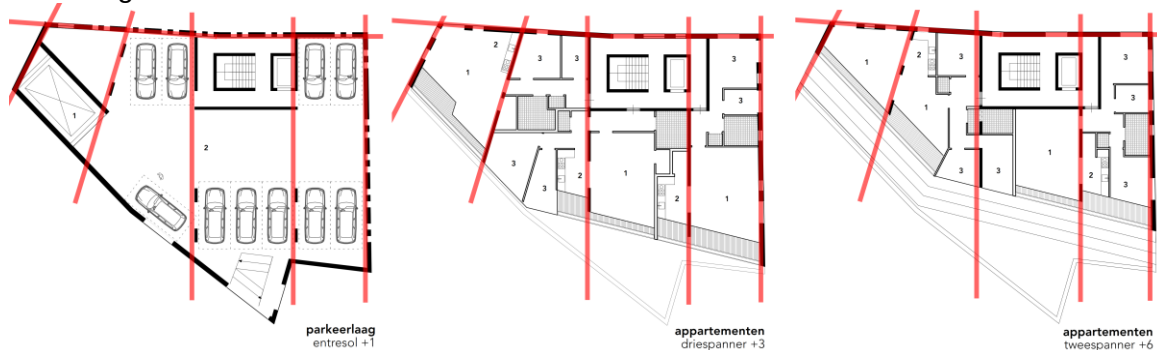
Figuur 2: Uitgangspunt woningscheidende wanden

Indien dit als uitgangspunt voor de eventuele dragende lijnen zou worden gekozen, geeft dat, naast een onhandige vorm, ook problemen op andere verdiepingen, zoals de hoger gelegen appartementen en de parkeergarage zoals te zien is in Figuur 3.



Figuur 3: Wooningscheidende wanden niet overal gewenst

De meest logische dragende lijnen, die over alle verdiepingen haalbaar lijken, zijn weergegeven in Figuur 4.

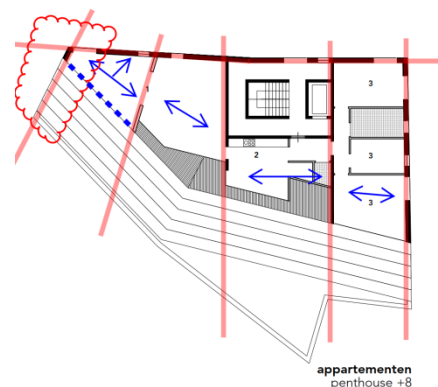


Figuur 4: Voorlopige dragende lijnen

Met de weergegeven dragende lijnen kan voor allerlei verschillende bouwsystemen gekozen worden. Wel moet rekening worden gehouden met de overgang tussen verschillende functies met inachtneming van de uitgangspunten zoals omschreven in hoofdstuk 1.

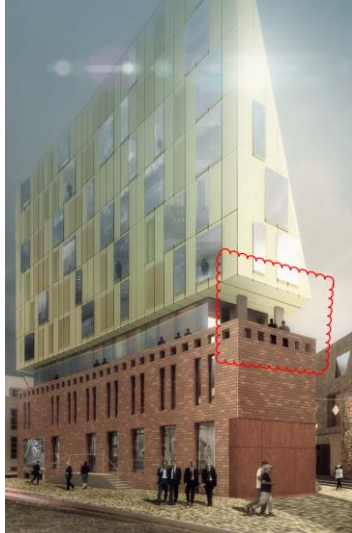
3.1.2 Knelpunten

1. Vloeroverspanning op de hoogste bouwlagen; Door het slanker worden van het gebouw over de hoogte, ontstaat er een situatie waarin de meest voor de hand liggende vloeroverspanning niet meer uitvoerbaar is. Hier moet een oplossing voor worden bedacht. Zie Figuur 5 voor een verduidelijking.

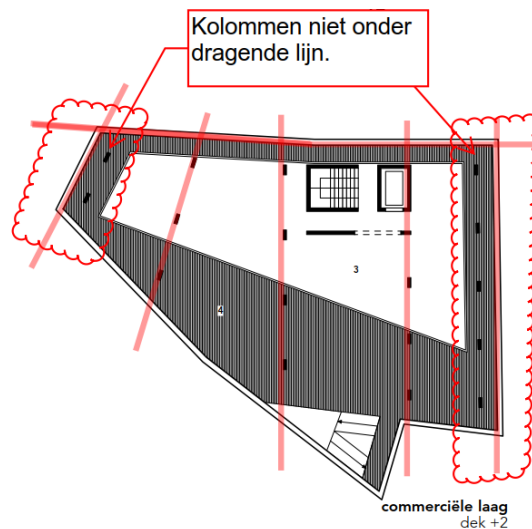


Figuur 5: Knelpunt 1

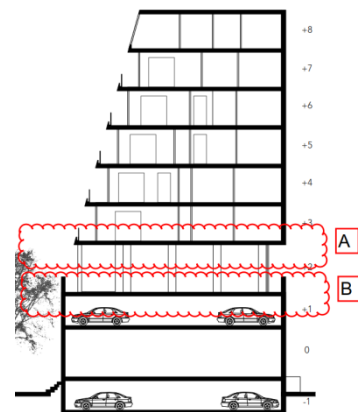
2. Een aantal verdiepingen lager, op de opengewerkte verdieping, doet zich een probleem voor op dezelfde plek. Ook aan de andere zijde bevindt zich dat probleem. De architect heeft hier een terras met balustrade voorzien waardoor de dragende lijn naar binnen is geplaatst. Zie Figuur 6 voor een verduidelijking van de problematiek.
- 3.



Figuur 6: Knelpunt 2



4. Er vinden twee overgangen plaats tussen de appartementen, het restaurant en de parkeergarage. Het restaurant is geen reguliere verdieping, maar een opengewerkte. Hierbij is het gewenst om de verdieping zo open mogelijk te houden en zijn scheidingswanden hoogstwaarschijnlijk ongewenst. Daaronder bevindt zich een parkeergarage die bij voorkeur kolomvrij is. Het probleem is dus 2-ledig.
 - A) De overgang van de appartementen naar een opengewerkte verdieping.
 - B) De overgang van de opengewerkte verdieping, naar een parkeergarage.



Figuur 7: Knelpunt 3a en 3b

3.1.3 Optimalisatie

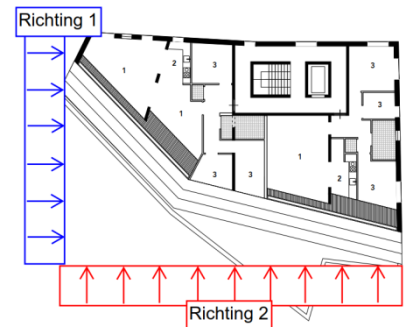
In de variantenstudies wordt enkel gebruik gemaakt van ontwerpvergelijking en analyses. Optimalisatie onder invloed van materiaalkwaliteit en geometrie wordt hierbij buiten beschouwing gelaten. De materialen zoals vastgesteld in de uitgangspunten worden gehanteerd. Voor een eerste inschatting van de totale kosten en CO₂ emissie is dat afdoende. In de definitieve uitwerking van een project kan hierin geoptimaliseerd worden.

3.2 Appartementen

In de variantenstudie worden de problemen vanaf boven naar beneden beschouwd. Allereerst worden de appartementen bekeken waarbij eerst een beschouwing wordt gemaakt voor het oplossen van de stabiliteit. Vervolgens worden de vloersystemen uitgelicht, waarna een voorlopige meest gunstige bouwsystematiek wordt bepaald. In de bouwsystematiek wordt een keuze gemaakt voor het type structuur dat wordt gebruikt en tevens een definitieve keuze gemaakt in de materialisering.

3.2.1 Stabiliteit

De afdracht van de verticale belastingen wordt afgehandeld in de hierna volgende paragrafen waarbij een analyse wordt gemaakt van gehele draagstructuur. Voor de afdracht van horizontale belastingen dient er een afzonderlijke beschouwing gemaakt te worden. Wind kan optreden in 2 richtingen, die vanaf nu worden aangeduid als richting 1 en richting 2 zoals weergegeven in Figuur 8. Het afdragen van horizontale belastingen kan op verschillende wijzen worden gerealiseerd. Hierbij is de constructeur soms zeer afhankelijk van de gekozen uitvoeringssystematiek en vice versa.

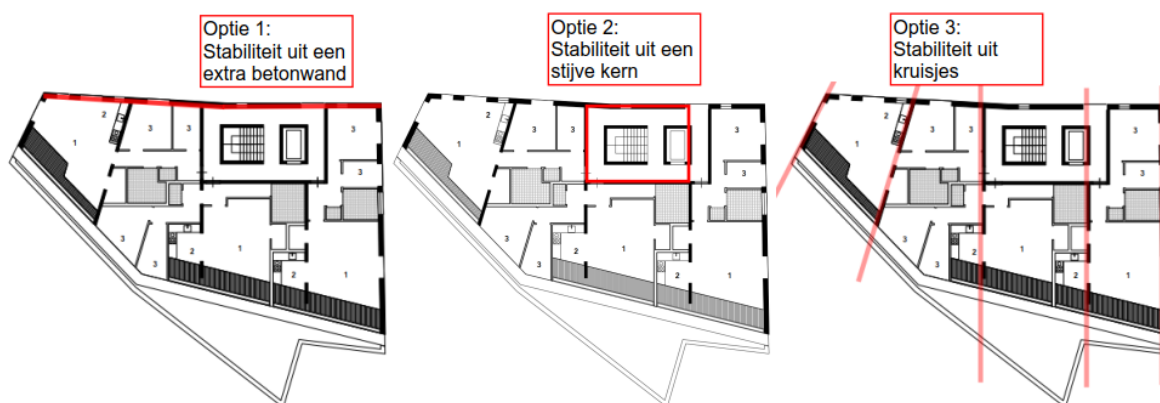


Figuur 8: Aangenomen windrichtingen

Indien men een beschouwing maakt van windrichting 2 komt dit het meest duidelijk naar voren.

Als er gekozen wordt voor een dragende wandstructuur, worden de wanden in de lengterichting horizontaal belast. Doordat wanden doorgaans een hoge bovenbelasting hebben, kunnen dergelijke horizontale belastingen gemakkelijk worden opgenomen. Dat geldt zelfs voor kalkzandsteenwanden die nauwelijks in staat zijn trekkrachten op te nemen. Mocht er gekozen wordt voor een kolom-ligger structuur, is de mogelijkheid tot opnemen van horizontale belastingen door deze zelfde verticaal dragende lijn sterk gereduceerd. Stabiliteit uit portalen is lastig te realiseren, zeker naarmate het gebouw hoger wordt. Een stabiliteitskern ligt dan zeer voor de hand. Omdat in het huidige ontwerp veel openingen zitten in het centrale gedeelte, trappenhuis en liftschaft, is het lastig om een kern met windverbanden uit te voeren in een staalconstructie. Hierbij wordt de keuze voor een stabiliteitskern dus noodgedwongen uitgevoerd in betonwanden. Een nadeel van de huidige voorgestelde geometrie zijn de relatief korte wanden met openingen en beperkte bovenbelasting.

Voor de wind in richting 1 heeft de constructeur meer mogelijkheden voor het realiseren van een stabiel gebouw. De verschillende opties zijn weergegeven in Figuur 9. Doordat er open gevels zijn aan beide lange zijden van het gebouw is een dragende gevel, die tevens de stabiliteit verzorgt, geen optie.



Figuur 9: Opties stabiliteit

Naast de afzonderlijke opties is natuurlijk ook een combinatie van bovengenoemde opties een mogelijkheid. Het combineren is mede afhankelijk van de input van andere partijen. Een combinatie van optie 1 en optie 2 ligt niet echt voor de hand. De wanden in de kern zijn in deze richting langer dan in de andere richting. Daarom is de verwachting dat een kern op zichzelf zal volstaan en de wand uit optie 1 overbodig is.

Optie 1: hier is gekozen voor een extra betonwand ten behoeve van stabiliteit. Er is gekozen voor een betonwand, omdat een kalkzandsteenwand geen trekkracht op kan nemen en bovenbelasting ontbreekt of zeer beperkt is. Afhankelijk van het ontwerp van de gevelopeningen, is het mogelijk dat de wand niet geschikt is om als stabiliteitselement te dienen. Tevens kan de eerder genoemde ontbrekende bovenbelasting een probleem vormen waardoor deze optie niet erg geschikt lijkt. Wel kan deze optie voordeel bieden bij het later te behandelen knelpunt met betrekking tot de vloeroverspanningen op de hoger gelegen verdiepingen.

Optie 2: een kern biedt voldoende mogelijkheid om de stabiliteitskrachten op te nemen. De lengte van de wanden, in verhouding tot de hoogte van het gebouw is 4.3:1, is goed te realiseren. Het geeft het gebouw veel flexibiliteit voor verdere indeling van gevelopeningen en vrijheid in ruimte-indeling. Door de beperkte bovenbelasting is kalkzandsteen niet geschikt als stabiliteitskern, omdat deze geen trekkrachten op kan nemen.

Optie 3 is, afhankelijk van de gekozen uitvoeringssystematiek, in meer of mindere mate geschikt om krachten op te nemen. Voor stabiliteit uit kruisjes ter plaatse van de dragende lijnen zijn monoliete knopen veruit het meest geschikt.

Grootste nadeel van optie 1 en 3 zijn de onderliggende overgangsconstructies. Hierbij is het lastig om deze systematiek door te zetten naar beneden. De invulling van de overgangsconstructie is nog niet volledig uitgewerkt, maar de toevoeging van horizontaalbelasting uit wind zou de oplossing complexer maken. Complex wil niet per se zeggen dat het onmogelijk is, maar het brengt vaak ook extra kosten met zich mee.

3.2.2 Vloersystemen

Voor de vloeren wordt gebruik gemaakt van de vloeren die zijn beschreven in het plan van aanpak en die ook zijn meegenomen in de literatuurstudie. Per vloersysteem wordt er een koppeling gemaakt naar de invloed op het stabiliteitssysteem en de wand-/liggersystemen.

De vloersystemen bij dit ontwerp hangen, zoals in de vorige paragraaf beschreven, deels samen met de stabiliteit. Indien er gekozen wordt voor optie 3 uit de vorige paragraaf, stabiliteit uit kruisjes, is het van belang dat het grootste deel van het kruisje een monoliete betondoor-snede betreft. Bij optie 1 en 2 is het van belang dat de schijfkrachten ten gevolge van wind naar de stabiliteitselementen afgedragen kan worden, waardoor er een betonschijf nodig is. De grootste overspanning is ongeveer 7,5 meter en er is een eis met betrekking tot een vlakke afwerking van de onderzijde van de vloer. Dit maakt dat niet elk type vloersysteem geschikt is. In deze paragraaf worden alleen de relevante vloeren omschreven.

Om iets te kunnen zeggen over CO₂ emissie en kosten van de vloeren is het belangrijk de verschillende vloertypes te dimensioneren. De dimensies van een vloer kunnen gestuurd worden op verschillende uitgangspunten waarvan de volgende aan bod komen in deze variantenstudie:

- Sterkte, volgens Eurocode 1992-1-1.
- Stijfheid volgens Eurocode 1992-1-1.
- Brandwerendheid (minimaal 120 minuten).
- Geluiddichtheid (contactgeluid: massa 600 kg/m² [SBRCUR [1]] of 54db).

De totale CO₂ emissie en kosten worden steeds in tabelvorm weergegeven.

Kanaalplaatvloer of appartementen vloer

Kanaalplaatvloeren zijn doorgaans niet geschikt als woningscheidende vloer, omdat de kanalen ervoor zorgen dat de geluiddichtheid laag is. Om deze reden heeft VBI een vloer ontwikkeld met kleinere kanalen en dus een grotere massa. Voor een overspanning van 7.5m zijn 2 typen geschikt:

- Appartementenvloer d=260.
- Appartementenvloer d=320.

De appartementenvloer met een dikte van 260mm moet m.b.t. geluiddichtheid nog voorzien worden van een uitvlak-laag en een verend opgelegde dekvloer. Bij een vloer van 320mm zijn er geen extra voorzieningen nodig om te voldoen aan de geluideis van het Bouwbesluit.

Een verend opgelegde dekvloer is duurder dan 60mm extra beton. Het is niet gelukt de emissie van een zwevende dekvloer te achterhalen, waardoor het ontwerp in dit geval kosten-gestuurd wordt. De variant van 260mm wordt daarom niet verder in beschouwing genomen. Ter plaatse van de scheiding tussen het restaurant en de woning zijn er extra eisen met betrekking tot geluiddichtheid. Een 320 vloer voldoet daar niet aan. Het uitgangspunt is voorlopig dat er in het restaurant een systeemplafond komt waardoor alsnog aan deze eis wordt voldaan. Door een snelle ontwerpberekening kan op de site van VBI worden vastgesteld of de vloer voldoet aan de overige hierboven gestelde eisen. Een appartementenvloer 320 blijkt daaraan te voldoen.

CO ₂ emissie totaal	83	kg/m ²
Kosten totaal	69	€/m ²

Invloed op stabiliteit en wand-ligger systeem

Bij een kanaalplaatvloer is het zonder druklaag lastig om schijfwerking te realiseren. Eventueel kan met een druklaag en een vloer van 260mm dikte voldaan worden aan de eisen met betrekking tot geluiddichtheid. Grootste nadeel zijn de extra handelingen waardoor er extra kosten en tijd in de vloer gaan zitten. Een alternatief is een koppeling tussen de verschillende platen door de kanalen plaatselijk open te hakken. Deze opengehakte kanalen worden onderling gekoppeld met stalen verbindingen die vervolgens worden aangestort. Ook deze optie kost veel extra geld, tijd en emissie.

Voor de onderliggende draagconstructie is een kanaalplaatvloer minder prettig, omdat er geen monoliete koppeling is met bijvoorbeeld een wandstructuur, waardoor daar niet op materiaal bespaard kan worden. Daarnaast is een kanaalplaatvloer lastig in te passen in de geometrie, waardoor er veel pasplaten nodig zijn en is de mogelijkheid tot overstekken bij een kanaalplaatvloer zeer beperkt. Deze twee factoren zorgen voor een beperkte flexibiliteit van het vloersysteem.

In het werk gestorte betonvloer

Volgens de informatie van SBRCUR [1] is de minimale benodigde massa van een woningscheidende vloer, bij een eis van 59 decibel, 600kg/m², waarmee ook aan de eis voor de scheiding van de appartementen en restaurant wordt voldaan. Voor de vloer resulteert dit in een dikte van $6/24=0.25\text{m}$.

Voor de brandwerendheid is de minimum dikte, volgens tabel 5.8 van Eurocode 1192-1-2, 120mm met een wapeningsafstand van 40mm bij een plaat die in 1 richting krachten afdraagt. Deze eisen zijn voor een vloer op 2 steunpunten en doorgaande vloeren gelijk. Indien er bij de berekening gebruik is gemaakt van momentenherverdeling, is de minimum dikte opgeschroefd tot 200mm met een wapeningsafstand van 35mm. De dikte t.g.v. de geluiddichtheidseis is dus maatgevend.

Controle wapeningspercentage vloeren:

Maximaal optredend moment : $\frac{1}{8} * q * l^2 = \frac{1}{8} * 12.2 * 7.5^2 = 85.8 kNm/m$. De geschatte benodigde wapening is dan: $\frac{85.8 * 10^6}{0.9 * 220 * 435} = 996 mm^2/m$. Een basisnet Ø12-100 voldoet dan ruim. De verdeelwapening in de andere richting dient minimaal 20% te zijn, hiervoor wordt Ø8-200 aangehouden. Voorlopig wordt voor de boven- en onderwapening dezelfde samenstelling gehanteerd. Het resultaat is 89kg/m³. Dit komt ongeveer overeen met een economisch en duurzaam wapeningsontwerp.

CO ₂ emissie totaal	94	kg/m²
Kosten totaal	160	€/m²

Tot slot dient de slankheid/stijfheid te worden gecontroleerd. Dit wordt gedaan aan de hand van vergelijking 7.16a van Eurocode 1992-1-1:

$$l/d = K * [11 + 1.5 * \sqrt{f_{ck}} * \rho_0/\rho + 3.2 * f_{ck} * (\rho_0/\rho - 1)^{1.5}]$$

Met $\rho_0 = 10^{-3} \sqrt{f_{ck}} = 5.48 * 10^{-3}$; $\rho = \frac{1130}{1000 * 215} = 5.26 * 10^{-3}$; K=1.3 conform tabel 7.4N.

$$l/d = 1.3 * [11 + 1.5 * \sqrt{30} * 1.04 + 3.2 * 30 * (1.04 - 1)^{1.5}] = 1.3 * (11 + 8.5 + 0.9) = 20.4$$

l/d werkelijk = 7500/250=30>20.4 dus de slankheid voldoet.

Invloed op stabiliteit en wand-ligger systeem

Voor de samenhang van een constructie is een in het werk gestorte vloer ideaal. Het maakt alle koppelingen monoliet, waardoor alle verschillende onderdelen goed samenwerken. Schijfkrachten zijn perfect af te dragen en elk stabiliteitssysteem kan functioneren zonder extra voorzieningen. Er zijn nauwelijks extra kosten en er is weinig extra materiaal nodig ten opzichte van de ontwerpberekening.

Bij liggers en wanden geldt dat de vloer eventueel meegenomen kan worden in de effectieve breedte, waardoor de hoogte van een ligger gereduceerd kan worden of er meer ruimte ontstaat voor trekbandwapening bij een wand.

Breedplaatvloer

Een breedplaatvloer is in de berekening en bruikbaarheid in de praktijk nauwelijks anders dan een in het werk gestorte betonvloer. De schil is van prefabbeton, waardoor de samenstelling van het mengsel wat verandert. Tevens is er voor de voegen wat extra wapening nodig, hiervoor wordt 5% extra wapening gerekend. Aan alle randvoorwaarden verandert verder niets. Er wordt uitgegaan van een gangbare schildikte van 70mm. Doordat er bij dit gebouw geen positief buigende momenten in de voegen nodig zijn, is het momenteel actuele onderwerp met voegwapening bij breedplaten geen issue.

CO ₂ emissie schilvloer	36	kg/m²
CO ₂ emissie opstorting	69	kg/m²
CO ₂ emissie totaal	105	kg/m²
Kosten totaal	95	€/m²

Invloed op stabiliteit en wand-ligger systeem

Zoals eerder omschreven geldt bij breedplaatvloeren hetzelfde als voor in het werk gestorte betonvloeren. De extra voorzieningen ten behoeve van stabiliteit en samenhang zijn zeer beperkt. De meewerkende betonddoorsnede bij gecombineerde systemen is iets beperkter doordat de schil moeilijk geactiveerd kan worden.

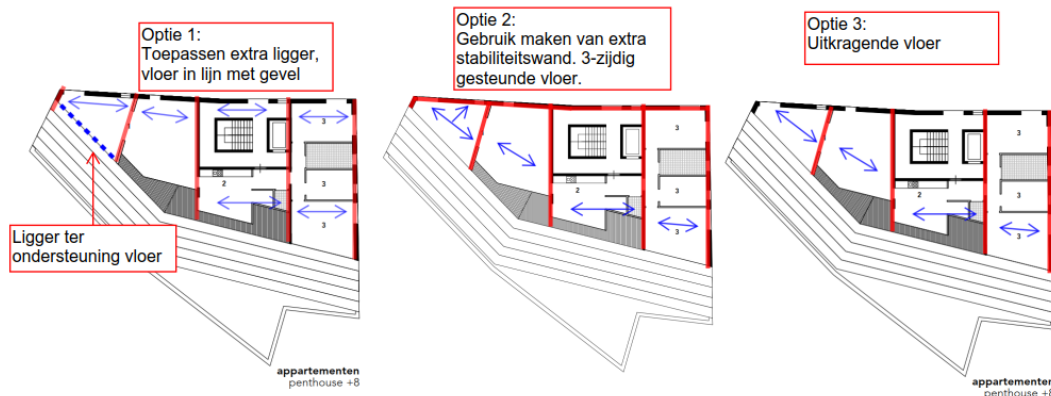
Breedplaatvloer met gewichtsbesparende elementen

Gewichtsbesparende elementen kunnen voor een reductie van ongeveer 25% van de betonmassa zorgen. Dit scheelt in massa van de vloer en dus ook in de massa van het gehele gebouw. Echter, door het toepassen van deze besparende elementen, is er ook extra hoogte met betrekking tot geluiddichtheid nodig, omdat de vloermassa omlaag gaat. Hierdoor wordt er nauwelijks gereduceerd op beton, tenzij er een zwevende dekvloer wordt toegepast.

Welke variant er ook wordt gekozen, bij woningbouw gaan de kosten en de CO₂ emissie omhoog, waardoor deze variant niet verder wordt meegenomen in de variantenstudie.

3.2.3 Knelpunten en conclusie vloersystemen

Door het slanker worden van het gebouw over de hoogte, ontstaat er een situatie waarin de meest voor de hand liggende vloeroverspanning op de bovenste bouwlaag niet meer uitvoerbaar is. Hier moet naar alternatieven gekeken worden. Voor dit probleem zijn enkele oplossingen voor te dragen:



Bij het toepassen van optie 2 en 3, is het niet mogelijk te kiezen voor een kanaalplaatvloer, waardoor de flexibiliteit van het ontwerp verhinderd wordt. Vervorming van de betonvloer is een belangrijk uitgangspunt bij de keuze voor optie 3. Bij optie 1 moet een extra ligger geplaatst worden, wat een afwijking van de systematiek is, extra geld kost en de vrije ruimte voor gevels beperkt.

Conclusie

Doordat het ontwerp van de architect duidelijke dragende lijnen voorschrijft, zijn de mogelijkheden voor het toepassen van verschillende vloersystemen beperkt. De beschouwde vloeren hebben de volgende CO₂ emissie kostenverhouding als weergegeven in nevenstaande tabel.

Vloersystemen	CO ₂ (Kg/m ²)	Kosten(€/m ²)
Kanaalplaatvloer	83	69
i.h.w.g. betonvloer	94	160
Breedplaatvloer	105	95

De kanaalplaatvloer, enkel gekeken naar de vloer, is de goedkoopste optie met de laagste CO₂ emissie. De keerzijde van de vloer is dat deze weinig flexibiliteit heeft in het oplossen van de knelpunten, dat de doorsnede hoger is dan de andere vloeren, de schijfkrachten slechter kunnen worden opgenomen en er pasplaten nodig zijn. Dat alles leidt tot extra kosten en emissie. Al met al kan gesteld worden dat, in de ontwerpfase van dit appartementencomplex, de keuze voor de kanaalplaat veel beperkingen met zich meebrengt.

Door bovengenoemde beperkingen lijkt een massieve betonvloer meer voor de hand te liggen. De breedplaatvloer biedt hierin veel voordelen ten opzichte van de in het werk gestorte betonvloer. Een in het werk gestorte vloer is flink duurder, terwijl de CO₂ emissie maar iets lager is. Naast de goedkopere vloer wordt de bouwtijd gereduceerd, wat uiteindelijk ook weer extra geld met zich mee kan brengen. Tot slot is de kwaliteit van de vloer meer gegarandeerd en zijn er minder materiaalverliezen bij een in het werk gestorte vloer. De beste keuze is dus een breedplaatvloer met een dikte van 250mm.

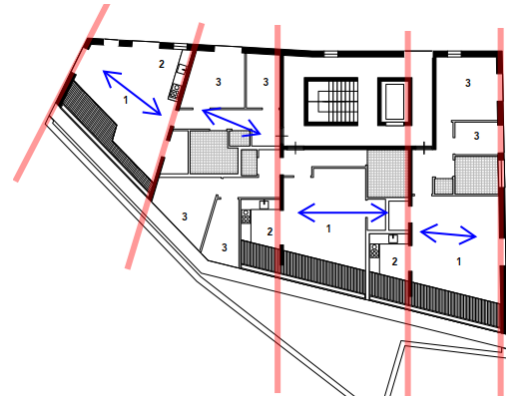
3.2.4 Bouwsystematiek

In deze paragraaf wordt een analyse gemaakt van de verschillende bouwsystematieken. Hierbij wordt in basis een vergelijk gemaakt tussen een wanden structuur en een kolom-ligger structuur. Beide typen draagstructuren worden ook weer ontworpen op verschillende materialen en uitvoeringsmethoden. Allereerst wordt een beschouwing gemaakt van de mogelijkheden en onmogelijkheden bij een wandenstructuur waarbij een eerste inschatting wordt gemaakt van de meest voor de hand liggende keuze op basis van kosten en CO₂ emissie. Tot slot volgt er een analyse en conclusie waarbij een definitieve keuze wordt gemaakt voor de verticale draagstructuur.

Dragende wanden structuur

Verticale afdracht

De wanden, die op de dragende lijnen staan, worden logischerwijs uitgevoerd als dragende elementen. Dit betreft de hoofddraagconstructie en is het enige dat in deze variantenstudie in beschouwing wordt genomen. De vloeroverspanning is haaks op de dragende lijnen, zoals weergegeven in Figuur 10. Het knelpunt voor de vloeroverspanning op de hogere verdiepingen wordt verderop in deze analyse beschouwd.



Figuur 10: Schets dragende lijnen en vloeroverspanning

Dragende wand systemen

Betonwanden kunnen worden uitgevoerd in verschillende systemen. Eén daarvan is een variant met tunnelbouw, waarbij zowel de wand als de vloer volledig in het werk gestort worden. Dit is een snel bouwsysteem indien er veel repetitie aanwezig is. Dit gebouw is niet repeterend over de hoogte, en ook niet in de breedte, dus is tunnelbouw niet in de beschouwing meegenomen. Er resten nu nog 4 opties te weten: prefabbetonwanden, holle betonwanden, in het werk gestorte betonwanden en kalkzandsteenwanden. Deze worden allen in de volgende paragrafen uitgelicht.

Dimensionering en vergelijking

Om iets te kunnen zeggen over CO₂ emissie en kosten van de wanden, is het belangrijk de verschillende bouwsystemen te dimensioneren. De dimensies van een wand kunnen gestuurd worden op verschillende uitgangspunten waarvan de volgende aan bod komen:

- Sterkte, volgens Eurocode 1992-1-1.
- Brandwerendheid (minimaal 120 minuten).
- Geluiddichtheid (contactgeluid: massa 550 kg/m² [SBRCUR [1]] of 54db).

In het werk gestorte wand

Volgens de informatie van [SBRCUR [1]] is de minimale benodigde massa van een wonscheidende wand 550kg/m². Dit resulteert in een minimale wanddikte van $5.5/24=0.23\text{m}$.

Volgens de Eurocode 1992-1-2 tabel 5.4 kan de geometrie van wanden ontworpen worden op basis van brandwerendheid. Hierbij geldt dat, bij een wand waarbij aan twee zijden brand is, en een brandwerendheid van 120 minuten vereist is, de minimale afmeting 220mm dient te zijn. Dat sluit mooi aan op het huidige ontwerp op basis van geluiddichtheid.

Tot slot kan op eenvoudige wijze gekeken worden naar de spanning in de wand ten gevolge van de bovenliggende belasting. De belasting uit de vloeren en wanden is bij benadering:

Vloeren per laag: $12.2 * 7.5 = 91.5 \text{ kN/m}$

Wanden per laag: $(0.23 * 25 * 1.2) * 3.0 = 20.7 \text{ kN/m}$

Mometaan-factoren buiten beschouwing gelaten, geeft dat op de onderste wand een belasting van: $(92+21)*6 = 673 \text{ kN/m}$. De optredende spanning in de wand is dan: $\frac{673*10^3}{230*1000} =$

2.9 N/mm^2

Deze spanning is laag en goed opneembaar. De benodigde wapening zal met het oog op sterkte zeer beperkt tot onnodig zijn, waardoor krimpvervorming maatgevend wordt. Er is uitgegaan van 75 kg/m^3 .

CO₂ emissie totaal	73	kg/m ²
Kosten totaal	220	€/m ²

Prefabbetonwand

Door de minimale afmetingen met betrekking tot brandwerendheid en geluiddichtheid, kan er weinig geoptimaliseerd worden bij de prefabbetonconstructie. Doordat prefabwanden opgedeeld zijn in elementen is vervorming door verhinderde krimp veel minder van invloed. De wapening kan daardoor gereduceerd worden tot 50 kg/m^3 .

CO₂ emissie totaal	108	kg/m ²
Kosten totaal	275	€/m ²

Holle wand

Door de minimale afmetingen met betrekking tot brandwerendheid gelden ook voor de holle wand systemen dat er aan de afmetingen weinig veranderd kan worden. Krimp is ook bij de holle wand minder een probleem, doordat deze wanden uit geprefabriceerde schijven met daarbinnen in het werk gestort beton bestaan. Omdat er wel koppelwapening aanwezig moet zijn voor de samenhang van de wanddelen, wordt gerekend met 75 kg/m^3 . De vraag is wel of het zinnig is om bij dergelijke afmetingen met een holle wand systeem te werken. Bij de standaard schillen van 70mm blijft er erg weinig beton over om in de praktijk te storten. Daarom wordt er voorlopig uitgegaan van schillen van 50mm, zodat het praktisch minder lastig uitvoerbaar is.

CO ₂ emissie wand schillen	45	kg/m ²
CO ₂ emissie aanstorting	41	kg/m ²
CO₂ emissie totaal	86	kg/m ²
Kosten totaal	120	€/m ²

Kalkzandsteen

Bij kalkzandsteen leidt de benodigde massa eis van een wand tot minimale wanddikte van $5.50/18=0.3 \text{ m}$. Bij deze afmetingen is de brandwerendheid van 120 minuten ook gehaald. Door de vergrote afmeting ten opzichte van het beton zal met een spanning van $\frac{673*10^3}{300*1000} = 2.2 \text{ N/mm}^2$ de wand ook voldoen aan de eisen ten aanzien van sterkte. Uitgaande van lijmblokken gelden de nevenstaande eenheidswaarden.

CO₂ emissie totaal	46	kg/m ²
Kosten totaal	133	€/m ²

Analyse wanden

Uit het ontwerp met de verschillende wandsystemen blijkt dat de CO₂ emissie en kosten van kalkzandsteenwanden laag zijn. Door de vele bewerkingen op de bouwplaats kan dit uiteindelijk, afhankelijk van de aannemer, wel een hele kostbare methode zijn.

Wandsystemen	CO ₂ (Kg/m ²)	Kosten (€/m ²)
i.h.w.g. betonwand	73	220
Prefab betond	108	275
Holle wand	89	120
Kalkzandsteenwand	23	133

Tabel 1: Overzicht wandsystemen

Kijkend naar de CO₂ emissie is een in het werk gestorte wand een goed alternatief. De kosten zijn echter hoog en de bewerkingen op de bouwplaats zijn omvangrijk. Holle wanden zijn een goed alternatief, doordat ook daar de emissie relatief laag en de kosten flink gereduceerd wor-

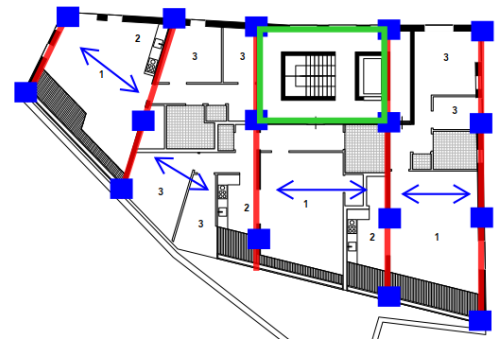
den. Het grote voordeel van beide systematieken is dat de verbinding met de vloer volledig of deels monoliet kan zijn, waardoor meer stijfheid en vormvrijheid gegenereerd wordt.

Het is duidelijk dat bij geprefabriceerde constructies de emissie hoger is, maar dat ook de kosten, puur gekeken naar het bouwdeel, toenemen. Omdat de bouwplaatsruimte beperkt is, centrum van Leeuwarden, zijn prefabbetonelementen wel heel geschikt. Daarnaast is de korte bouwtijd een voordeel voor de uitvoering. In de analyse van de kosten is niet meegenomen wat tijdbesparing over een geheel project oplevert, dat valt buiten de scope van dit afstudeeronderzoek.

Kolom-liggerstructuur

Opzet structuur

De dragende lijnen, zoals met de rode lijnen weergegeven in Figuur 11, worden in deze varianten uitgevoerd als liggers. Daarnaast worden er kolommen geplaatst om de liggers te ondersteunen. Deze kolommen zijn in de figuur weergegeven als vierkante blauwe elementen. De vloeroverspanning is bij alle varianten gelijk, aangegeven met de blauwe pijlen. De stabiliteitskern is met een groene omlijning aangeduid.



Figuur 11: Opzet structuur

Verticale afdracht

De bouwsystematiek kan bij deze varianten verschillen tussen een staal-, een beton-, of een staal-betonstructuur. Het structuurontwerp blijft echter altijd hetzelfde. De afdracht van de verticale belastingen gaat via de vloer, naar de liggers die worden ondersteund door kolommen. De kolommen zorgen voor verdere overdracht naar de overgangsconstructie onder de appartementen. In deze varianten worden wanden niet gebruikt als dragende elementen, wat andere ontwerppartijen meer vrijheid geeft voor de invulling van hun discipline. Voor de beschouwing van kosten, duurzaamheid en uitvoeringsvoor- en nadelen wordt enkel gekeken naar de wanden die zich bevinden op de dragende lijnen, ruimte- en woningscheidend. Alleen op die manier kan een vergelijking worden gemaakt met de varianten waarbij gebruik is gemaakt van dragende wanden. Het knelpunt voor de vloeroverspanning op de hogere verdiepingen wordt verderop in deze beschouwing geanalyseerd.

Bouwkundige woningscheidende wanden

Ruimte- en woningscheidende wanden kunnen beide worden uitgevoerd in tal van verschillende methoden. Vaak zijn kosten en uitvoeringstijd maatgevende onderdelen bij de keuze hierin. Voor alle kolom-ligger structuren worden als uitgangspunt dezelfde scheidingswanden gehanteerd. Een schatting van de kosten wordt gedaan via de website bouwkosten.nl [2], waarbij deze elementen geraamd zijn op 100€ per vierkante meter. Voor een schatting van de CO₂ emissie wordt gebruik gemaakt van de informatie van Faay [3], 70kg/m². Deze wanden wegen ook ongeveer 70kg/m², hebben een brandwerendheid van 120 minuten en een geluidisolatiewaarde van 59db [3].

Varianten

Voor het toepassen van kolom-liggerstructuur zijn onderstaande varianten beschouwd:

- Beton, in het werk gestort.
- Beton, in het werk gestort met geïntegreerde liggers.
- Beton, prefab.
- Staalstructuur.
- Staal-beton structuur.

Betonvariant in het werk gestort

Kolommen

Bij beton zijn er enkele manieren om de vorm te ontwerpen. Om te beginnen geeft de Eurocode 1992-1-1 een richtlijn voor de vereiste slankheid van de kolommen middels deze formule:

$\lambda_{lim} > \frac{20 \cdot A \cdot B \cdot C}{\sqrt{n}}$. Voor ongeschoorde kolommen kan men deze formule ombouwen, zie Bijlage

G: Achtergrond gebruikte formules, om tot een ontwerpbenadering te komen zoals onderstaand weergegeven. Op basis van slankheid wordt de volgende kolomafmeting voorgeschreven:

$$A_{c;ben} = \sqrt{\frac{N_{ed} \cdot l_0^2}{95.7 \cdot f_{cd}}} = \sqrt{\frac{2700 \cdot 3000^2}{95.7 \cdot 20}} = 112703.$$

Voor het ontwerp wordt een kolomafmeting van 350x350mm aangehouden. N_{ed} is samengesteld uit de belastingen uit de vloeren en bovenliggende wanden. Uitgaande van de oppervlakte belasting van 12.2kN/m² en bouwkundige wanden met een eigen gewicht van 70kg/m² is de te rekenen belasting op de kolom afgerond maximaal 12.2*7.5*5.75*5+0.7*5.75*5*3.2=2700kN.

Controle van de betonspanning levert een spanning van 22N/mm². Dat is vrij fors en dus zal er drukwapening benodigd zijn. Voor een snelle check van het wapeningspercentage kan gebruik gemaakt worden van deze formule waarin de drukspanning wordt gecontroleerd inclusief 2% drukwapening zoals onderstaand weergegeven.

$$A_{c;ben} = \frac{N_{ed}}{f_{cd} + 2\% \cdot f_{yd}} = \frac{2700 \cdot 10^3}{20 + 0.02 \cdot 435} = 94077 \text{ mm}^2 < 112703$$

Dat betekent dat inclusief drukwapening de huidige afmeting haalbaar is en dat de benodigde wapening niet erg uit de bocht schiet.

In de Eurocode 1992-1-2 staan, in tabel 5.2a en 5.2b, richtlijnen om de minimale geometrie op basis brandveiligheid te bepalen. Er kan gebruik worden gemaakt van Methode A. Een kolom van 350x350 is mogelijk met een wapeningsafstand van 57mm en minimaal 8 staven wapening. Voor het ontwerp wordt dit als afdoende beschouwd. Op hoger gelegen verdiepingen kan niet geoptimaliseerd worden, omdat dan niet wordt voldaan aan de eisen met betrekking tot brandwerendheid.

Liggers

Volgens het dictaat van “van der Marel” [4] geldt voor liggers een ontwerpregel $h=L/12.5$. Voor de huidige overspanning zou dat een balkhoogte van ongeveer 500mm betekenen. Omdat de belasting hier geen onderdeel van uitmaakt, wordt een andere ontwerpregel geschreven met een wapeningspercentage als uitgangspunt. Tevens volgens het dictaat van “van der Marel” [4] is een economisch wapeningsontwerp bij buigende elementen ongeveer 1% wapening aan de getrokken zijde, dat staat gelijk aan 80kg/m³. Dit bleek tijdens het vooronderzoek ook in de buurt van een duurzaam ontwerp te komen. Uitgaande van de welbekende vergelijking om wapening in te schatten ($A_{s;ben} = \frac{M_{ed}}{0.9 \cdot d \cdot f_{yd}}$), kan het moment afhankelijk worden gesteld van de lengte en belasting. Daarmee kan een duurzaam en economisch ontwerp gestuurd worden door d afhankelijk te stellen van het moment en het wapeningspercentage. Zie Bijlage G: Achtergrond gebruikte formules en spreadsheets voor het omrekenen van de formule:

$$h_{ben}^3 = \frac{q \cdot l^2}{16.48} = \frac{94 \cdot 5.75^2 \cdot 10^6}{16.48} = 1.88 \cdot 10^8 \rightarrow h_{ben} = 573 \text{ mm}.$$

Waarin q is opgebouwd uit de vloer en wandbelasting van: 12.2*7.5+0.7*3=94kN/m. Voor het ontwerp wordt een hoogte van 600mm aangehouden. Doordat de kolommen een afmeting hebben van 350mm is dit voor de

breedte van de balk ook praktisch in de uitvoering. De kolomwapening komt dan iets naar binnen te staan maar doordat het drukwapening betreft is dit geen probleem.

De maximaal optredende dwarskracht is $5.75/2 \cdot 94 = 270 \text{ kN}$. Dat levert een schuifspanning van $270 \cdot 1000 / (300 \cdot 600) = 1.5 \text{ N/mm}^2$. Dat valt binnen de grenzen van maximaal toelaatbare dwarskrachtspanning, maar er is wel dwarskrachtwapening nodig. Door de benodigde beugels en flankwapening zal de totale toegepaste wapening oplopen tot 190-200 kg/m^3 . Voor het inschatten van de CO_2 emissie en kosten wordt 200 kg/m^3 gehanteerd.

CO ₂ emissie kolommen	47	kg/m
CO ₂ emissie liggers	87	kg/m
CO2 emissie kolom-ligger: 47*3+87*5,75	641	kg
Kosten kolommen	110	kg/m
Kosten liggers	248	kg/m
Kosten kolom-ligger: 110*3+248*5,75	1756	kg

Betonvariant in het werk gestort met geïntegreerde liggers

Bij geïntegreerde liggers verandert er weinig ten opzichte van de hierboven beschreven variant. De enige afwijking is dat de liggers samenwerken met de vloer. De kolommen blijven hetzelfde en de liggers kunnen verlaagd worden met de hoogte van de vloer. Ervan uitgaande dat de vloer een dikte heeft van 250mm, is de benodigde balkhoogte onder de vloer dus: $600 - 250 = 350 \text{ mm}$. De breedte van 350mm blijft gehanteerd.

CO ₂ emissie kolommen	47	kg/m
CO ₂ emissie liggers	51	kg/m
CO2 emissie kolom-ligger: 47*3+51*5,75	434	kg
Kosten kolommen	110	kg/m
Kosten liggers	150	kg/m
Kosten kolom-ligger: 110*3+150*5,75	1193	kg

Betonvariant prefab

Kolommen

Prefab kolommen hebben een hogere materiaalkwaliteit dan in het werk gestort beton. Omdat brandwerendheid maatgevend is bij het ontwerp van de kolommen, kan de vorm niet worden geoptimaliseerd, dus wordt gerekend met een kolom 350x350. Wel kan de wapening gereduceerd, hiervoor wordt een percentage gehanteerd van 1%.

CO ₂ emissie kolommen	62	kg/m
CO ₂ emissie liggers	121	kg/m
CO2 emissie kolom-ligger: 62*3+121*5,75	882	kg
Kosten kolommen	210	kg/m
Kosten liggers	408	kg/m
Kosten kolom-ligger: 210*3+408*5,75	2976	kg

Liggers

Bij liggers heeft de verhoogde betonkwaliteit van prefab nauwelijks invloed op de wapening en geometrie. De uitgangspunten zullen gelijk blijven aan de in het werk gestorte liggers, enkel de betonsamenstelling verandert.

Staalvariant

Kolommen

Staal is een materiaal waarbij ontwerpsommen voor kolommen zeer lastig te maken zijn. De invloed van knik, en eventueel kip, is enorm. Je bent afhankelijk van enkele factoren die zich niet makkelijk laten vangen in ontwerpregels. De basis ontwerpregel voor staalkolommen, waarbij belasting geen invloedsfactor is: $h = L/8$. Mochten we dat voor deze verdiepingshoogte toepassen, dan levert dat een benodigde lengte en breedte van $3000/8 = 400 \text{ mm}$ (afgerond). Dat houdt in dat er minimaal iets in de orde grootte van een HEA400 à 125 kg/m , benodigd is.

Uitgaande van de Eurocode 1993-1- is er een reductie op de doorsnede capaciteit door de knikfactor: $N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{m1}}$ waarbij χ de knikfactor is. De knikfactor is van meerdere factoren af-

hankelijk en is daardoor niet geschikt voor ontwerpformules. Om het ontwerp te toetsen, wordt voorlopig uitgegaan van een knikfactor van 0.7. Dat houdt in dat de spanning in het staalprofiel maximaal $0.7 \cdot 460 = 322 \text{ N/mm}^2$ kan zijn. Het benodigde oppervlak kan door het omschrijven van de formule berekend worden met:

$$A_{ben} = \frac{N_{b,Rd} \cdot \gamma_{m1}}{\chi \cdot f_y} = \frac{2700 \cdot 10^3 \cdot 1}{322} = 84 \text{ cm}^2 \text{ dat komt overeen met een HEA280 à 76 kg/m of koker}$$

250x250x10 73 kg/m. Voor het ontwerp wordt uitgegaan van een HEA280, omdat het makkelijker is om hier brandwerende beplating en wandelementen tegenaan te monteren.

Voorlopig wordt ervan uitgegaan dat de kolommen brandwerend bekleed worden, waardoor er geen rekening gehouden hoeft te worden met brandwerendheid in de berekening.

Liggers

In de literatuurstudie is vastgesteld dat S460 vaak het meest duurzame materiaal is voor staalconstructies. Voor het ontwerp wordt dit steevast gehanteerd, waardoor doorbuiging maatgevend wordt geacht. In de definitieve uitwerking kan blijken dat een andere materiaalkwaliteit goedkoper is. De emissie zal hetzelfde zijn. Indien ontworpen wordt op stijfheid kan met de volgende formule de benodigde stijfheid van het profiel worden bepaald: $\delta = \frac{5 \cdot q \cdot l^4}{384 \cdot EI}$. Indien I afhankelijk wordt gesteld van de variabelen volgens Bijlage G: Achtergrond gebruikte formules en spreadsheets volgt de volgende vergelijking:

$I_{ben} = \frac{(9.6 \cdot 7.5 + 3 \cdot 0.7) \cdot 5750^3}{64512} = 21836 \cdot 10^4 \text{ cm}^4$ wat gelijk staat aan een HEA320, IPE400 of een HEB300. IPE is hierbij het meest lichte profiel à 66 kg/m. Dit profiel heeft echter veel invloed op de beschikbare doorloophoogte, waardoor gekozen wordt voor een HEA320 welke 90mm lager is en 98kg per strekkende meter weegt. De optredende kipspanning bij het staalprofiel zal zijn: $\frac{1}{8} \cdot \frac{q \cdot l^2}{W} = \frac{1}{8} \cdot \frac{94 \cdot 5750^2}{1480 \cdot 10^3} = 262 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$. Verwacht wordt dat de ligger niet zal kippen door zijn hoge kipstijfheid en lage optredende spanning.

CO ₂ emissie kolommen	37	kg/m
CO ₂ emissie brandwerende bekleding kolom	54	kg/m
CO ₂ emissie liggers	47	kg/m
CO ₂ emissie brandwerende bekleding ligger	45	kg/m
CO2 emissie kolom-ligger: 91*3+92*5,75	802	kg
Kosten kolommen	144	kg/m
Kosten brandwerende bekleding kolomme	101	kg/m
Kosten liggers	186	€/m
Kosten brandwerende bekleding liggers	85	€/m
kosten kolom-ligger: 245*3+271*5,75	2293	€/m

Staal-beton variant

Kolommen

Staal-betonkolommen kunnen goed ontworpen worden op brandwerendheid. Er zijn eenvoudige tabellen waarin de brandwerendheid afgelezen kan worden. Deze tabellen zijn geldig voor volledig omstorte profielen, die tevens het uitgangspunt zijn voor dit ontwerp.

Er is een basiseis om aan de ontwerptabellen te voldoen, waarin de minimale hoogte van de doorsnede in relatie tot de lengte van de kolom 1:30 is. In dit geval is de minimale hoogte van de doorsnede dus: $3500/30 = 117 \text{ mm}$. Duidelijk mag zijn dat dit geen maatgevende factor is. De ontwerptabellen van het boek staal-beton geven bij een brandwerendheidseis van 120 minuten 2 opties m.b.t. de minimale doorsnede. De minimale buitenafmeting is 300mm in combinatie met een betondekking op de wapening van 40mm en dekking op het staalprofiel van 75mm. Dat zou ruimte laten voor een staalprofiel van 150x150mm. Dat is vrij krap en lijkt niet voor de hand liggend. Het alternatief is een kolom met een buitenafmeting van 350mm. De voorgescreven dekking op de wapening is daarbij 30mm en de dekking op het staalprofiel 50mm.

Het ontwerp van een staal-beton kolom laat zich niet makkelijk met een handberekening toetsen. Daarom is er een eenvoudige spreadsheet gemaakt om een geschoorde staal-beton kolom te controleren op sterkte. Bij een belasting van 2700kN en een lengte van 3.0m voldoet een afmeting van 350x350mm. Hierbij is gebruik gemaakt van een staalprofiel HEA160 en een minimum wapening. In het definitief ontwerp geldt ook voor staal-betonkolommen dat hierbij nog geoptimaliseerd kan worden. Zie voor de volledige in- en uitvoer van de berekening: Bijlage G: Achtergrond gebruikte formules en spreadsheets.

Liggers

Voor staal-beton liggers zijn geen specifieke ontwerpregels gevonden. Het uitgangspunt bij staal-beton liggers is dat deze doorgaans 2 profielen lichter kunnen dan basis stalen liggers en dat de kwaliteit niet groter mag zijn dan S355, omdat er anders een extra reductiefactor op de betonkwaliteit moet worden toegepast. Omdat stijfheid maatgevend is, is de materiaalkwaliteit hoogstwaarschijnlijk geen probleem.

De stalen zijn ontworpen als een HEA320. Voor het ontwerp van de staal-betonliggers wordt dus uitgegaan van een HEA280 à 76kg/m.

De maximale schuifspanning op te nemen door de deuvels is de kleinste waarde van: $A_s \cdot f_{yd}$ of $A_c \cdot f_{cd}$ dus:

$9730 \cdot 355 / 1000 = 3454 \text{ kN}$ of $b_{eff} \cdot c \cdot h_c \cdot f_{cd} \cdot 0.85 = 5750 \cdot 2/8 \cdot 250 \cdot 20 / 1000 = 6109 \text{ kN}$. Bij een deuvelcapaciteit van 65kN betekent dat een totaal aantal van $3454 / 65 = 53$ deuvels per liggerhelft. De hart op hartafstand van de deuvels is dan ongeveer 200mm indien ze 2-zijdig geplaatst zijn, dat is goed realiseerbaar.

CO ₂ emissie kolommen staalprofiel	15 kg/m
CO ₂ emissie kolommen betonaandeel	29 kg/m
CO ₂ emissie liggers	37 kg/m
CO ₂ emissie brandwerende bekleding ligger	39 kg/m
CO ₂ emissie brandwerende bekleding deuv	15 kg/m
CO₂ emissie kolom-ligger: 44*3+91*5,75	655 kg
Kosten kolommen	58 kg/m
Kosten brandwerende bekleding kolomme	60 kg/m
Kosten liggers	122 €/m
Kosten brandwerende bekleding liggers	74 €/m
Kosten brandwerende bekleding liggers	15 €/m
kosten kolom-ligger: 118*3+211*5,75	1567 €/m

Analyse kolom-liggers

In Tabel 2 is een overzicht gemaakt van de CO₂ emissie en kosten van de verschillende bouwsystematieken van de kolom-liggerstructuur.

Als er bij de vloeren wordt gekozen voor een massieve betonvloer ter plaatse van de appartementen is een geïntegreerde ligger zeer interessant om toe te passen. Door het optimale materiaalgebruik en de beperkte extra handelingen is deze variant het goedkoopst en zorgt het ook voor de minste CO₂ emissie. Indien er enkel wordt gekeken naar liggers onder de vloer, is uit de tabel te halen dat een ter plaatse gestorte betonconstructie of een staal-beton constructie de minste emissie en minste kosten met zich meebrengt. Er valt dus in dit geval te concluderen dat een goedkope constructie ook een duurzame constructie is.

Kolom-ligger systemen	CO ₂ (Kg)	Kosten(€)
i.h.w.g. beton basis	641	1756
i.h.w.g. beton geïntegreerd	434	1193
Prefab beton	882	2976
Staal	802	2293
Staal-beton	655	1567

Tabel 2: Overzicht kolom-ligger systemen

Voor een vergelijking met een methodiek met wanden moeten ook de bouwkundige scheidingswanden meegenomen worden in de beoordeling. Dit kan het beste gedaan worden door de kosten van een kolom-liggerstructuur terug te rekenen tot een wandoppervlakte. Daar kunnen dan de kosten en emissie van een bouwkundige wand worden opgeteld. De waarden uit Tabel 2 zijn gebaseerd op één kolom per 5.75m en één ligger per verdiepingshoogte van 3m. De waarden kunnen daardoor gedeeld worden door $5.75 \cdot 3 = 17.25 \text{ m}^2$. Het resultaat, inclusief

bouwkundige scheidingswanden en de vergelijking met de reeds geanalyseerde wandsystemen is opgenomen in de conclusie.

Knelpunten bouwsystematiek

Het knelpunt voor de vloeroverspanning op de hoger gelegen verdiepingen is bij de keuze voor een wand of kolom-ligger structuur ook van belang. Bij het toepassen van een bouwsysteem met kolommen en liggers, ondersteund door een stabiliteitskern, is optie 2 voor stabiliteit, waarbij een extra stabiliteitswand wordt gemaakt, niet erg aantrekkelijk, omdat er dan 2 verschillende bouwsystemen door elkaar gebruikt worden. Wel is het makkelijk op te lossen met een extra ligger. Dat is goedkoper en daarnaast ook sneller uitvoerbaar. Door de extra ligger is er wel een reductie van de beschikbare hoogte voor kozijnen.

Conclusie bouwsystematiek

Uit Tabel 3 blijkt dat het erg ongunstig is om voor een kolom-ligger structuur te kiezen met bouwkundige scheidingswanden. Door de hoge emissie (70kg/m²) van de bouwkundige element en de kosten van 100€/m² is eigenlijk vooraf al te stellen dat het geen concurrent is van dragende woningscheidende wanden.

Naast dat de kosten en emissie van een kolom-ligger structuur groter is, heeft deze systematiek ook nog een ander nadeel. Doordat de liggers vaak onder de vloer komen, kan dat beperkingen opleveren voor de vrije hoogte en dus verdiepingshoogte. Er moeten immers wel deuren gemaakt kunnen worden met de in het Bouwbesluit gestelde beschikbare vrije hoogte.

Kolom-ligger + bouwkundige scheidingswanden	CO ₂ (Kg/m ²)	Kosten (€/m ²)
i.h.w.g. beton basis	107	200
i.h.w.g. beton geïntegreerd	95	168
Prefab beton	120	270
Staal	116	231
Staal-beton	107	190
Wandsystemen		
i.h.w.g. betonwand	73	220
Prefab betond	108	275
Holle wand	89	120
Kalkzandsteenwand	46	133

Tabel 3: Overzicht bouwsystemen

3.2.5 Conclusie appartementen

In de voorgaande paragrafen kan geconcludeerd worden dat traditionele, in het werk gestorte vloeren en wanden een zeer efficiënte bouwsystematiek vormen, wanneer men enkel kijkt naar de emissie en kosten van de bouw delen. Doordat de bouw tijd steeds meer onder druk komt en het uitstellen van realisatie van een gebouw geld kost, wordt tegenwoordig toch steeds vaker gekozen voor geprefabriceerde constructies. Naast emissie en kosten is het constructieve aspect ook interessant. Een constructie op traditionele wijze heeft een grote samenhang en robuustheid. Daarentegen heeft een prefabconstructie een hoge gegarandeerde kwaliteit en kan op dimensies geoptimaliseerd worden. De variant met de minste invloed op de maatschappij is dus een variant met kalkzandsteenwanden en kanaalplaatvloer. Ook vanuit het kosten oogpunt is dit een aantrekkelijke optie, waardoor een duurzame constructie niet duurder hoeft te zijn.

Voor de verdere uitwerking wordt vanuit didactisch oogpunt gekozen voor breedplaatvloeren met in het werk gestorte betonwanden.

3.3 Overgangsconstructie A, van appartementen naar restaurant

De overgangsconstructie kan op verschillende wijzen worden uitgevoerd. Voor de verticale draagconstructie wordt gekeken naar de volgende opties:

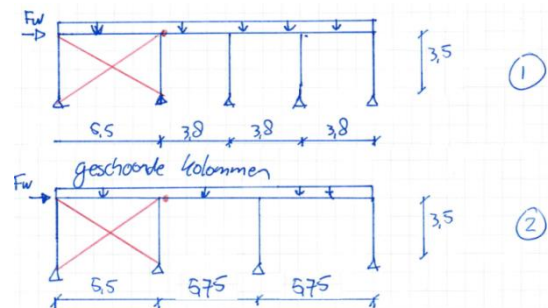
- kolommenstructuur: beton, staal, en staalbeton;
- penanten op regelmatige afstand: beton en kalkzandsteen;
- K- en V-kolommenstructuur: beton, staal, en staalbeton.

De belangrijkste graadmeters blijven, zoals bij de gehele variantenstudie, de CO₂ emissie en de kosten van de constructie.

3.3.1 Kolommenstructuur

Onafhankelijk van de bovenliggende constructies zijn er verschillende manieren waarop de kolommen gepositioneerd kunnen worden. De meest voor de hand liggende posities zijn opgenomen in Figuur 12. Tevens is het mogelijk om met onregelmatige overspanning te werken. Voor de variantenstudie wordt type 2 gebruikt, met een regelmatige overspanning van ongeveer 5,75m.

Door de wanden ter plaatse van de kern, die in elke vorm en elke structuur aanwezig zijn, ligt het niet voor de hand om de kolommen en liggers een stabiliserende functie te geven. In de variantenstudie bij de overgangsconstructie wordt dus uitgegaan van een geschoord systeem. Mocht tijdens de uitwerking van de definitieve variant, met een stabiliteitskern en geschoorde kolommen, blijken dat de kern op zichzelf niet kan voldoen aan de eisen voor sterkte, stijfheid en/of stabiliteit, kan altijd nog gekeken worden naar de mogelijkheid om de kolom-liggerstructuur een portaalwerking mee te geven. Bepalend, onafhankelijk van het materiaal, voor een kolom-liggerstructuur is de bovenbelasting.



Figuur 12: Enkele opties kolommenstructuur

De rekenwaarde van de belasting op de kolommen is samengesteld uit de belastingen uit de vloeren en bovenliggende wanden. Uitgaande van de oppervlakte belasting van 12.2kN/m² en betonwanden met een dikte van 250mm is de te rekenen belasting op de kolom afgerond maximaal: $N_{ed} = 12.2 \cdot 7.5 \cdot 5.75 \cdot 6 + 6.25 \cdot 5.75 \cdot 6 \cdot 3.2 = 3900 \text{ kN}$.

Bij het bepalen van liggerafmetingen is men altijd zeer afhankelijk van de bovenliggende constructie. Indien voor de bovenliggende woningscheidingen is gekozen voor in het werk gestorte betonwanden, is er via boogwerking veel afdracht naar puntvormige ondersteuning en is een beperkte balkhoogte realiseerbaar. Mocht er echter worden gekozen voor kalkzandsteenwanden, dan is deze boogwerking minder goed te gebruiken en kunnen vloeren ook niet worden "opgehangen" in de wand rondom sparingen om de aanwezige drukkogen alsnog te gebruiken. Het andere uiterste zijn kolommen waardoor je direct afhankelijk bent van de positionering van de kolommen op hoger gelegen verdiepingen. Omdat een kolommenstructuur in de appartementen niet echt voor de hand ligt, wordt deze voorlopig even buiten beschouwing gelaten. Het uitgangspunt voor de liggers wordt dat er maximaal 2 bouwlagen, inclusief betonwand, voor belasting op de liggers zorgen en dat de rest via boogwerking of alternatieve krachtwerking wordt afgedragen. De karakteristiek lineaire belasting is daardoor: $(7 \cdot 2 \cdot 7.5 \cdot 2 + 0.25 \cdot 25 \cdot 6) + 2.6 \cdot 2 \cdot 7.5 = 145.5 + 39 = 185 \text{ kN/m}$. Voor de uiterste grenstoestand levert dat een rekenwaarde van $145.5 \cdot 1.35 + 39 \cdot 1.5 \cdot 0.4 = 220 \text{ kN/m}$.

Betonvariant in het werk gestort

Kolommen

Voor de betonkolommen wordt de ontwerpfilosofie gevolgd als volledig is omschreven in paragraaf 3.2.4 bij het onderdeel kolommenstructuur: $A_{c,ben} = \sqrt{\frac{N_{ed} \cdot l_0^2}{95.7 \cdot f_{cd}}} = 158027 \text{ mm}^2$. Doorsnede lengte en breedte is dus 400mm. Een alternatief is een ronde kolom als dit als beeldbepalend wordt gewenst. Dan is een afmeting van Ø450 vereist. Voorlopig wordt voor het vergelijk een vierkante kolom gehanteerd. Controle van de betonspanning inclusief 2% ning: $A_{c,ben} = \frac{N_{ed}}{f_{cd} + 2\% \cdot f_{yd}} = \frac{3900 \cdot 10^3}{20 + 0.02 \cdot 435} = 135889 \text{ mm}^2 < 158027$. Dat betekent dat, inclusief drukwapening, de huidige afmeting haalbaar lijkt en binnen de normen valt.

Omdat de kolommen voor dit ontwerp langer zijn dan 3 meter, kan Methode A in paragraaf 5.3 Eurocode brand niet gebruikt worden, waardoor methode B gebruikt dient te worden. De huidige geometrie voldoet niet aan de randvoorwaarden van de tabel. Het wapeningspercentage kan worden aangepast zodat de η -factor omlaag gaat en de ω -factor omhoog gaat. Een andere mogelijkheid is het vergroten van de betonvorm, hierdoor gaat de η -factor omhoog en kan de ω -factor gestuurd worden door de wapening. Er zijn nu 2 opties:

- kolom 450x450, wapeningspercentage 4%, wapeningsafstand van 50mm;
- kolom 500x500, wapeningspercentage 2%, wapeningsafstand van 60mm.

De kolom 500x500 is duurzamer en goedkoper dus het beste alternatief. In de definitieve berekening kan door een berekening inclusief brand worden aangetoond dat kleinere afmetingen met minder wapening eventueel toch voldoen.

Liggers

Voor betonliggers wordt ook gebruik gemaakt van de ontwerpfilosofie volgens 3.2.4.

$$h_{ben}^3 = \frac{q \cdot l^2}{16.48} = \frac{220 \cdot 5.75^2 \cdot 10^6}{16.48} = 4.41 \cdot 10^8 \rightarrow h_{ben} = 761 \text{ mm. Balkafmeting } 400 \times 800 \text{ mm.}$$

De maximaal optredende dwarskracht is $5.75/2 \cdot 220 = 633 \text{ kN}$. Dat levert een schuifspanning van $633 \cdot 1000 / (400 \cdot 800) = 1.97 \text{ N/mm}^2$. Dat valt binnen de grenzen van maximaal toelaatbare dwarskrachtspanning. Door de benodigde beugels en flankwapening zal de totale toegepaste wapening oplopen tot 220-250 kg/m³. Voor het inschatten van de CO₂ emissie en kosten wordt 225kg/m³ gehanteerd.

CO ₂ emissie kolommen	104	kg/m
CO ₂ emissie liggers	166	kg/m
CO₂ emissie kolom-ligger: 104*3,5+166*5,75	1319	kg
Kosten kolommen	164	kg/m
Kosten liggers	365	kg/m
Kosten kolom-ligger: 164*3,5+365*5,75	2673	€

Betonvariant prefab

Kolommen

Hiervoor worden dezelfde ontwerpregels gehanteerd als bij een in het werk gestorte kolom. Omdat de betonkwaliteit wat hoger ligt, komen hier iets afwijkende antwoorden uit. Op basis van slankheid: $A_{c,ben} = 116711 \text{ mm}^2$. Hieruit rolt een benodigde lengte en breedte van 350mm. Controle van de betonspanning levert een spanning van 32 N/mm^2 . Dat is kleiner dan de maximaal toelaatbare spanning ($55/1.5 = 37 \text{ N/mm}^2$), waardoor deze kolom met de toepassing van een relatief laag wapeningspercentage hoogstwaarschijnlijk zal voldoen.

Brandwerendheid is een ander verhaal. Door de hoge betonkwaliteit is de η -factor laag, maar de kleinere afmeting is ω -factor hoog. Een afmeting van 450x450 wordt geacht aan de voorschriften te voldoen. Tevens is een wapeningspercentage van 2% nodig. Door een berekening zou men wel eens tot gunstigere antwoorden kunnen komen, maar voor het ontwerp is dit het uitgangspunt.

Liggers

De uitgangspunten van de liggers zullen gelijk blijven aan de in het werk gestorte liggers met een aangepaste betonkwaliteit.

CO ₂ emissie kolommen	123	kg/m
CO ₂ emissie liggers	227	kg/m
CO₂ emissie kolom-ligger: 123*3,5+227*5,75	1736	kg
Kosten kolommen	305	kg/m
Kosten liggers	451	kg/m
Kosten kolom-ligger: 305*3,5+451*5,75	3661	€

Staalvariant

Kolommen

Voor de staalkolommen wordt de ontwerpfilosofie gevolgd die volledig is omschreven in paragraaf 3.3.1 bij het onderdeel "Staalvariant". Door de extra lengte ten opzichte van paragraaf 3.3.1 wordt de knikfactor verlaagd naar 0.6. Dat houdt in dat de spanning in het staalprofiel maximaal $0.6 \cdot 460 = 276 \text{ N/mm}^2$ kan zijn. Controle HEA450: $\sigma_s = 3900 \cdot 10^3 / 17803 = 219 \text{ N/mm}^2$. Voor het ontwerp is dat afdoende.

Liggers

Ook voor de liggers wordt de ontwerpfilosofie van paragraaf 3.2.4 bij het onderdeel "Staalvariant" gevolgd. De benodigde stijfheid van het profiel: $I_{ben} = \frac{185 \cdot 5750^3}{64512} = 54517 \cdot 10^4 \text{ cm}^4$ wat gelijk staat aan een HEA450, IPE550 of een HEB400. IPE is hierbij het meest lichte profiel à 106kg/m, waarbij dan de kipspanning bepalend is of het profiel zal voldoen. De optredende

kipspanning bij het staalprofiel zal zijn: $\frac{\frac{1}{10} \cdot q \cdot l^2}{W} = \frac{\frac{1}{10} \cdot 220 \cdot 5.75^2}{2441 \cdot 10^3} = \frac{298 \text{ N}}{\text{mm}^2}$. De ligger is door hoge druk van

boven hoogstwaarschijnlijk kippig gesteund, wat eenvoudig gecontroleerd kan worden conform Eurocode 1993-1-1, 6.3.2.5, waarin NB.72 maatgevend is. $N_{st;ed} = 0.01 \cdot (17.2 \cdot 210) \cdot 298 \cdot 10^{-3} = 11 \text{ kN}$. Indien we uitgaan van een kipsteun op elke meter is dit een horizontaal belasting van 11kN/m. Uitgaande van een wrijvingscoëfficiënt van 0.1 heeft de bovenliggende betonconstructie een weerstand van $220 \cdot 0.1 = 22 \text{ kN/m}$, waardoor deze ligger als volledig kippig gesteund mag worden uitgerekend.

CO ₂ emissie kolommen	68	kg/m
CO ₂ emissie brandwerende bekleding kolommen	55	kg/m
CO ₂ emissie liggers	51	kg/m
CO ₂ emissie brandwerende bekleding liggers	51	kg/m
CO₂ emissie kolom-ligger: 123*3,5+102*5,75	1017	kg
Kosten kolommen	270	kg/m
Kosten brandwerende bekleding kolommen	104	kg/m
Kosten liggers	201	€/m
Kosten brandwerende bekleding liggers	97	€/m
kosten kolom-ligger: 374*3,5+298*5,75	3023	€/m

Staal-beton variant

Kolommen

Voor de staal-beton kolommen wordt de ontwerpfilosofie gevolgd die volledig is omschreven in paragraaf 3.2.4 bij het onderdeel "Staal-beton variant". Voor het ontwerp van de kolom is gebruik gemaakt van dezelfde spreadsheet met een belasting van 3900kN en een lengte van 3.5m. Hierbij voldoet een afmeting van 350x350mm met een staalprofiel HEA240 en wapening 4Ø12.

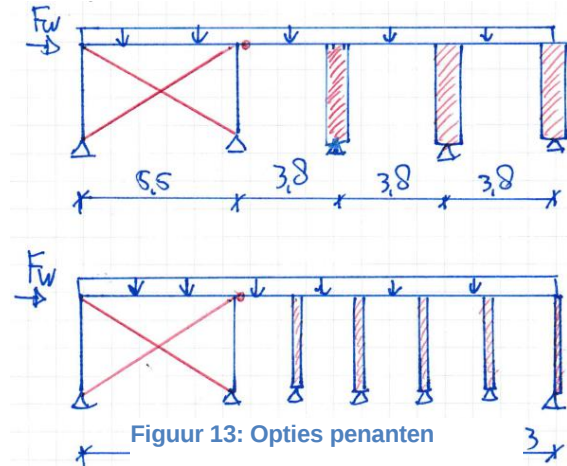
CO ₂ emissie kolommen staalprofiel	29	kg/m
CO ₂ emissie kolommen betonaandeel	41	kg/m
CO ₂ emissie liggers	38	kg/m
CO ₂ emissie brandwerende bekleding liggers	40	kg/m
CO ₂ emissie brandwerende bekleding deuvels	15	kg/m
CO₂ emissie kolom-ligger: 70*3,5+93*5,75	780	kg
Kosten kolommen	117	kg/m
Kosten brandwerende bekleding kolommen	75	kg/m
Kosten liggers	134	€/m
Kosten brandwerende bekleding liggers	76	€/m
Kosten brandwerende bekleding liggers	15	€/m
kosten kolom-ligger: 192*3,5+225*5,75	1966	€/m

Liggers

Zoals omschreven in 3.2.4, is het uitgangspunt bij staal-beton liggers dat deze doorgaans 2 profielen lichter kunnen dan basis stalen liggers met een maximale staalkwaliteit S355. Hierbij wordt dus uitgegaan van een IPE450 à 79kg/m. Aandachtspunt hierbij is de grote schuifspanning tussen de vloer en ligger, waardoor er veel deuvels toegepast dienen te worden. De maximale schuifspanning is de kleinste waarde van: $A_s \cdot f_{yd}$ of $A_c \cdot f_{cd}$ dus: $9880 \cdot 355 / 1000 = 3507 \text{ kN}$ of $b \cdot e_{ff} \cdot c \cdot h_c \cdot f_{cd} \cdot 0.85 = 5750 \cdot 2 / 8 \cdot 300 \cdot 20 / 1000 = 7331 \text{ kN}$. Bij een deuvelcapaciteit van 65kN betekent dat een totaal aantal van 56 deuvels per liggerhelft. De hart op hartafstand van de deuvels is dan ongeveer 200mm indien ze 2-zijdig geplaatst zijn, dat is goed realiseerbaar.

3.3.2 Penanten

Penanten zijn eigenlijk een soort alternatieve kolommen. Ze dienen eenzelfde functie, maar verschillen in vorm. Waar kolommen doorgaans 2-assig symmetrisch zijn, is dat voor penanten niet het geval. Penanten zijn rechthoekige elementen waardoor deze in de zwakke as vaak slanker zijn. Dat kan voor een architect of gebruiker een voordeel zijn. Penanten zijn doorgaans gemaakt van beton of kalkzandsteen en niet van staal. Een voordeel voor het huidige ontwerp kan zijn dat penanten goed door te zetten zijn in de parkeergarage, waardoor er een duidelijke dragende, verticale lijn is en de constructie consequent is. Het grootste nadeel van penanten is dat deze in de zwakste as vaak erg slank zijn en dus relatief weinig capaciteit hebben.



Door deze slankheid worden voor het ontwerp 2 varianten tegen het licht gehouden, waarbij in beide gevallen de overspanning relatief kort is. Zie voor een illustratie van de varianten Figuur 13.

Voorlopig wordt een breedte aangehouden van 250mm, zodat de aansluiting op de bovenliggende wanden makkelijk te maken is én dat met zekerheid wordt voldaan aan de eisen m.b.t. brandwerendheid volgens tabel 5.4. Voor het ontwerp wordt wederom gebruik gemaakt van de Eurocode 1992-1-1. Deze geeft een richtlijn voor de vereiste slankheid van de kolommen met deze formule: $\lambda_{lim} > \frac{20 \cdot A \cdot B \cdot C}{\sqrt{n}}$

Deze keer wordt de formule omgebouwd naar een variant waarbij x bepaald wordt. x is hierbij het veelvoud van b , wat de lengte van de benodigde penant weergeeft. $x > \frac{N_{ed} \cdot l_0^2}{95.7 \cdot b^4 \cdot f_{cd}}$

De puntlast die gerekend dient te worden, is hierbij iets gereduceerd van 3900kN naar een afgeronde waarde van $3900/5.75 \cdot 3.8 = 2600$ kN in verband met de kortere overspanning van de penanten. De benodigde penantlengte is: $\frac{N_{ed} \cdot l_0^2}{95.7 \cdot b^4 \cdot f_{cd}} \cdot b = \frac{2600 \cdot 10^3 \cdot 3900^2}{95.7 \cdot 250^4 \cdot 20} \cdot 250 = 4.3 \cdot 250 = 1065$ mm -> Voor het ontwerp wordt 1100mm aangehouden.

Het totale betonoppervlak is dus $1100 \cdot 250 = 275.000$ mm². Dat betekent dat de penant een verhouding heeft van meer dan 4:1 waardoor het als wand beschouwd moet worden. Het uitgangspunt m.b.t. brandwerendheid is dus juist. Hoogstwaarschijnlijk is er wel vrij veel wapening nodig om met een dergelijk slankheid te voldoen op basis van sterkte en stijfheid. Er wordt uitgegaan van een wapeningspercentage van 4%.

Optie 2 met de kortere overspanning wordt uitgewerkt met $N_{ed} = 3900/5.75 \cdot 2.3 = 1560$ kN.

$\frac{N_{ed} \cdot l_0^2}{95.7 \cdot b^4 \cdot f_{cd}} \cdot b = \frac{1560 \cdot 10^3 \cdot 3900^2}{95.7 \cdot 250^4 \cdot 20} \cdot 250 = 2.6 \cdot 250 = 640$ mm. Door deze verhouding komt dit element weer in de categorie kolommen, waardoor een minimum breedte van 450mm is vereist in verband met brandwerendheid. Deze variant wordt dus niet verder in beschouwing genomen.

Door de korte overspanning t.g.v. de penanten van optie 1 is het mogelijk te reduceren op de balkafmetingen ten opzichte van een kolommenstructuur. Eventueel is het zelfs mogelijk om de balken volledig te integreren in de vloer. De rekenwaarde van het moment is:

$$1/8 \cdot 230 \cdot 3.8^2 = 415 \text{ kNm.}$$

Als het moment door een vloer met een dikte van 250mm opgenomen moet worden, is de benodigde wapening: $\frac{M_{ed}}{0.9 \cdot d \cdot f_{yd}} = \frac{415 \cdot 10^6}{0.9 \cdot 220 \cdot 435} = 4818 \text{ mm}$. Door de slank oplegging is de spreidingsbreedte van de aan te spreken wapening zeer beperkt, waardoor het maximale wapeningspercentage van 1,85 wordt overschreden. Er zullen balken moeten worden toegepast.

$$h_{ben}^3 = \frac{q \cdot l^2}{16.48} = \frac{230 \cdot 3.8^2 \cdot 10^6}{16.48} = 2.01 \cdot 10^8 \Rightarrow h_{ben} = 586 \text{ mm}$$

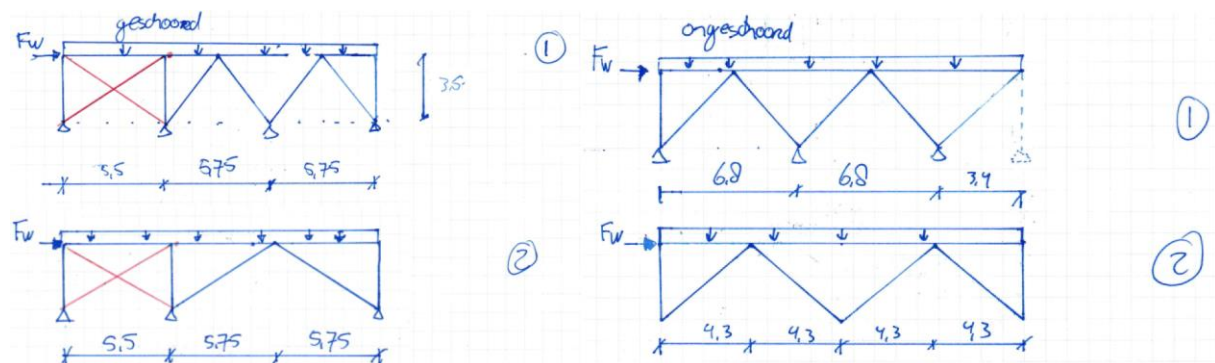
Ontwerpafmeting 300x600mm.

Om een vergelijk met de kolommen te kunnen maken, wordt, voor de CO₂ emissie en kosten, voor de liggers per lengte van 5.75m gerekend en voor de kolommen met een factor 5.75/3.8=1.51, om te compenseren voor het toepassen van meer elementen per overspanning.

Penanten in het werk gestort		Penanten prefab	
CO ₂ emissie penanten	176 kg/m	CO ₂ emissie penanten	193 kg/m
CO ₂ emissie liggers	92 kg/m	CO ₂ emissie liggers	126 kg/m
CO₂ emissie kolom-ligger: 176*3,5*1,51+92*5,75	1459 kg	CO₂ emissie kolom-ligger: 193*3,5*1,51+126*5,75	1745 kg
Kosten penanten	194 kg/m	Kosten penanten	360 kg/m
Kosten liggers	248 kg/m	Kosten liggers	308 kg/m
Kosten kolom-ligger: 194*3,5*1,51+248*5,75	2451 €	Kosten kolom-ligger: 360*3,5*1,51+308*5,75	3674 €

3.3.3 V- en K-kolommen

Minder standaard bij de toepassing van gebouwen zijn V- of K-kolommen. Niet gangbaar wil niet per se zeggen onmogelijk of inefficiënt. Het grootste nadeel bij dit type kolommen is de beperkte doorgang die ontstaat. Wel blijft de ruimte meer transparant dan bij bijvoorbeeld penanten of wandschijven. Voor de toepassing van V- of K-kolommen kan op allerlei verschillende manieren gekozen worden zoals in Figuur 14 weergegeven.



Figuur 14: Varianten V- of K-kolommen

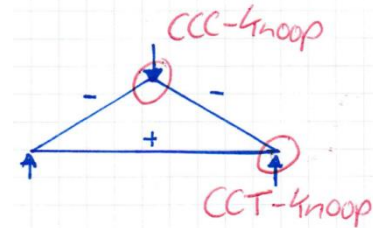
Voor deze variantenstudie wordt variant 2 van de geschoorde kolommen beschouwd. Het voordeel van variant 1 is, dat er meer kolommen zijn, waardoor de afmetingen beperkter zijn, echter de vrije doorgang wordt meer beperkt. Het grootste voordeel van variant 2 is dat de vrije doorgang zo maximaal mogelijk is gehouden en dat daarnaast de krachten al richting de randen van de constructie worden afgedragen, wat voor minder problemen zal zorgen voor de overgangsconstructie met krachtsafdracht in de parkeergarage.

De diagonale kolommen worden enkel belast op normaalkracht. De totale globale verticale kracht die ze moeten opnemen, is gelijk aan de helft van de andere midden kolommen: 1950kN. Per kolom dient er ook een globale horizontale kracht te worden afgedragen van $1950 \cdot 5.75 / 3.5 = 3200 \text{ kN}$. De normaalkracht per kolom is: $\sqrt{3200^2 + 1950^2} = 3750 \text{ kN}$

De kolommen worden dus iets minder belast dan een verticale kolom, maar er zijn er ook 2 nodig. Doordat de lengte van de kolommen toeneemt naar $\sqrt{5.75^2 + 3.5^2} = 6.7$ meter zijn ze 2

keer zo lang, waardoor knik meer maatgevend wordt. Deze variant zou normaliter, puur kijkend naar deze overgangsconstructie, vanuit constructief -, duurzaam - en kosten oogpunt niet de voorkeur krijgen, ware het niet dat er ook een groot voordeel zit aan deze oplossing.

In de definitieve uitwerking van deze variant, in geval van een betonconstructie, dient er veel aandacht besteed te worden aan de detaillering van de knopen zoals geschetst in Figuur 15. Daarnaast is de trekkracht in de vloer met een orde grootte van 3200kN een belangrijk aandachtspunt.



Figuur 15: Aandachtspunten

Betonvariant in het werk gestort

Ook hier wordt ontworpen volgens de filosofie als omschreven in 3.2.4.

$$A_{c,ben} = \sqrt{\frac{N_{ed} \cdot l_0^2}{95.7 \cdot f_{cd}}} = \sqrt{\frac{3750 \cdot 10^3 \cdot 6700^2}{95.7 \cdot 20}} = 296635 \rightarrow \text{Ontwerpafmeting: } 600 \times 600 \text{ mm.}$$

Controle van de betonspanning levert 10.4N/mm². Dat is een lage spanning, waardoor wordt verwacht dat de kolom met een wapeningspercentage van maximaal 2% ruim zal voldoen op basis van sterkte, stijfheid en stabiliteit. Het moment en de dwarskracht die ontstaan t.g.v. het eigen gewicht van de kolom worden verwaarloosd.

Gebruikmakend van tabel 5.2a uit Eurocode 1992-1-2 wordt met een wapeningspercentage van 2% ruimschoots voldaan aan de eisen ten aanzien van brandwerendheid. Voor het ontwerp wordt het percentage van 2% aangehouden, omdat er eventueel ook wat beugels en dwarskrachtwapening vereist is.

Liggers

Voor de liggers verandert er door de gekozen overgangsconstructie weinig. De oplegging zal een stuk breder zijn, waardoor het feitelijke moment wat afvlakt boven de aansluiting van de kolommen. Voor het ontwerp worden dezelfde afmetingen aangehouden als bij de variant waarbij er een verticale kolom in het midden staat.

CO ₂ emissie kolommen	139	kg/m
CO ₂ emissie liggers	166	kg/m
CO2 emissie kolom-ligger: 139*6,7*2+166*5,75	2817	kg
Kosten kolommen	249	kg/m
Kosten liggers	365	kg/m
Kosten kolom-ligger: 249*6,7*2+365*5,75	5435	€

Betonvariant prefab

Kolommen

Hiervoor worden dezelfde ontwerpregels gehanteerd als bij een in het werk gestorte kolom. Omdat de betonkwaliteit wat hoger ligt, komen hier iets afwijkende resultaten naar voren. Het benodigd betonoppervlak op basis van de limiet slankheid is 219080mm². Ontwerpafmeting: 500x500mm.

Als er een wapeningspercentage van 2% wordt aangehouden, in combinatie met een dekking van 40mm, voldoet deze kolom ook aan tabel 5.2a met brandwerendheid als uitgangspunt.

CO ₂ emissie kolommen	154	kg/m
CO ₂ emissie liggers	227	kg/m
CO2 emissie kolom-ligger: 154*6,7*2+227*5,75	3369	kg
Kosten kolommen	300	kg/m
Kosten liggers	451	kg/m
Kosten kolom-ligger: 300*6,7*2+451*5,75	6613	€

Liggers

De uitgangspunten van de liggers zullen gelijk blijven aan de in het werk gestorte liggers met een aangepaste betonkwaliteit.

Variant staalconstructie

Kolommen

Ook hier wordt ontworpen volgens de filosofie als omschreven in 3.2.4. Door de grote lengte van de kolommen wordt, in tegenstelling tot de recht kolommen, een knikfactor van 0.4 gehanteerd.

$A_{ben} = \frac{N_{ed} \gamma_{m1}}{\chi \cdot f_y} = \frac{3750 \cdot 10^2}{0.4 \cdot 460} = 20380 \text{ mm}^2$ wat gelijk staat aan ongeveer een HEA600 à 178 kg/m.

Liggers

Voor de liggers verandert er door de gekozen overgangsconstructie weinig en wordt het oorspronkelijke profiel IPE550 aangehouden.

Staal-beton variant

Kolommen

De kolom is weer gecontroleerd door de in paragraaf 3.2.4 eerder genoemde spreadsheet.

Bij een belasting van 3750 kN en een lengte van 6.7 m voldoet een afmeting van 400x400 mm.

Hierbij is gebruik gemaakt van een staalprofiel HEA260 en wapening 4Ø12. Zie voor de volledige in- en uitvoer van de berekening: *Bijlage G: Achtergrond gebruikte formules en spreadsheets*.

Liggers

Voor de liggers verandert er door de gekozen overgangsconstructie weinig en wordt het oorspronkelijke profiel IPE450 aangehouden.

CO ₂ emissie kolommen	85	kg/m
CO ₂ emissie brandwerende bekleding kolommen	85	kg/m
CO ₂ emissie liggers	51	kg/m
CO ₂ emissie brandwerende bekleding liggers	51	kg/m
CO₂ emissie kolom-ligger: 170*6,7*2+102*5,75	2865	kg
Kosten kolommen	338	kg/m
Kosten brandwerende bekleding kolommen	160	kg/m
Kosten liggers	201	€/m
Kosten brandwerende bekleding liggers	97	€/m
kosten kolom-ligger: 498*6,7*2+298*5,75	8387	€/m

CO ₂ emissie kolommen staalprofiel	37	kg/m
CO ₂ emissie kolommen betonaandeel	54	kg/m
CO ₂ emissie liggers	38	kg/m
CO ₂ emissie brandwerende bekleding liggers	40	kg/m
CO ₂ emissie brandwerende bekleding deuvelds	15	kg/m
CO₂ emissie kolom-ligger: 91*6,7*2+93*5,75	1754	kg
Kosten kolommen	145	kg/m
Kosten brandwerende bekleding kolommen	110	kg/m
Kosten liggers	134	€/m
Kosten brandwerende bekleding liggers	76	€/m
Kosten brandwerende bekleding liggers	15	€/m
kosten kolom-ligger: 255*6,7*2+225*5,75	4711	€/m

3.3.4 Knelpunt overgang met naar binnen staande kolommen

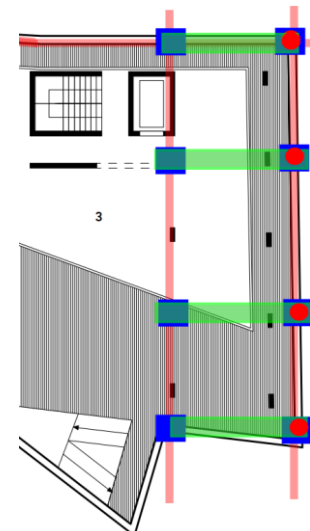
Voor het knelpunt (2), waarbij de kolommen naar binnen staan, zijn bij de vloeren ook al enkele varianten behandeld. Als de vloeren op uitkraging worden geconstrueerd met lichte wand elementen, is de verwachting dat bij in het werk gestorte betonvloeren het mogelijk is om de verticale belasting richting het hart van de constructie te voeren. Eventueel zou de vloer plaatselijk iets verdikt moeten worden om wat extra stijfheid te genereren.

Een ander alternatief, waarbij de dragende lijn in de gevel is opgenomen, is om de bovenliggende constructie op te vangen door middel van consoles. Bij een dragende wand is de belasting gespreid, waardoor dit mogelijk moet zijn. Afhankelijk van de gekozen draagconstructie bij de hierboven beschreven overgang, kan er extra constructiehoogte nodig zijn. De arm waarover het moment moet worden opgenomen, ongeveer 1.2 meter is beperkt waardoor het moment niet erg groot zou zijn.

Uit paragraaf 3.3.1 blijkt dat een lijnlast in het midden van een constructie ongeveer 230 kN/m is. Ter plaatse van de gevel is deze lijnlast gehalveerd, maar moet de gevel nog worden toegevoegd. Uitgaande van metselwerk, waarvan 30% open over 6 lagen, is dat een extra belasting van $(0.83 \cdot 0.18 \cdot 20 \cdot 6 \cdot 3) \cdot 1.2 = 65 \text{ kN/m}$. Een rekenwaarde van $230/2 + 65 = 180 \text{ kN/m}$. In geval

van een wand is het moment dat moet worden opgenomen in de vloer dus $180 \cdot 1.2 = 216 \text{ kNm}$. Dat is met een 300mm dikke vloer en wapening $\varnothing 16-90$ prima opneembaar. Bij een schuifspanning van $180/300 = 0.6 \text{ N/mm}^2$ zijn er echter wel beugels nodig over de hele breedte op deze krachten op te nemen.

Bij de toepassing van kolommen in de bovenliggende constructie, wat niet voor de hand ligt, is het mogelijk om plaatselijk liggers over te laten steken die dan functioneren als een vorm van consoles voor de bovenbelasting. In Figuur 16 is hier een schematische weergave van gemaakt. De blauwe elementen geven de kolommenstructuur weer, de rode cirkels de puntlasten en de zwarte elementen zijn op dit moment penanten die als tussensteunpunt dienen. Afhankelijk van de onderliggende gekozen wijze van afdracht kunnen deze elementen nog van vorm, afmeting en positie verschillen. In de huidige weergave zijn het door de architect geschetste en gewenste penanten.



Figuur 16: Alternatief met consoles

3.3.5 Conclusie

Varianten	CO ₂ (Kg)	Kosten(€)
<i>Kolommen</i>		
i.h.w.g.	1319	2673
Prefab	1738	3661
Staal	1017	3023
Staal-beton	916	1966
<i>Penanten</i>		
in het werk gestort	1459	2451
Prefab	1745	3674
<i>V- en K kolommen</i>		
in het werk gestort	2820	5435
Prefab	3369	6613
Staal	2865	8387
Staal-beton	1754	4710

Tabel 4: Kosten en CO₂ emissie overgangsconstructie

De ontwerpen van de varianten zoals omschreven in paragraaf 3.3.1 tot en met 3.3.3 zijn, voor wat betreft de kosten en CO₂ emissie, weergegeven in Tabel 4.

De variant met V- dan wel K-kolommen is erg lastig te vergelijken met de andere varianten. Deze variant is namelijk ook een oplossing voor de overgang naar de parkeergarage, waardoor de winst in kosten en emissies ook op de onderliggende constructie van toepassing is. Dat is niet zichtbaar in deze vergelijking.

In alle varianten komt naar voren dat prefabbeton vaak een niet duurzame, maar wel kostbare oplossing is.

Er wordt altijd enkel naar het element zelf gekeken, waardoor kostenvoordelen als bouwtijd en andere verdiensten als eerdere ingebruikname van het gebouw niet naar voren komen. Hierdoor worden de financiële voordelen van prefab onderbelicht, maar is de conclusie met betrekking tot emissie overduidelijk. Prefabbeton is geen duurzame oplossing.

Staal is vaak één van de meest duurzame, maar ook dure oplossingen, waarbij in dit geval geoptimaliseerd kan worden door het materiaal te combineren met beton en dus naar staal-beton oplossing te werken. De emissie en kosten van een staalconstructie zitten voor een groot deel in de brandwerende bekleding waar, bij een staal-beton structuur, geen of in mindere mate sprake van is.

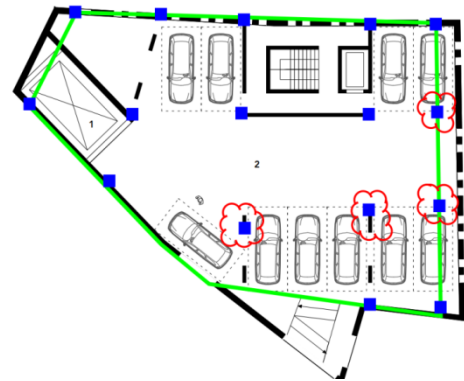
In het midden zweeft de optie van een in het werk gestorte betonconstructie die zowel op het gebied van duurzaamheid als op het gebied van kosten een middenmoter is. Als er, zoals bij de appartementen, gebruik gemaakt kan worden van aansluitende in het werk gestorte beton-delen als een vloer of wand, kan dit echter veel gunstiger uitpakken. De hoogte wordt gereduceerd, de bekisting beperkt en dus is er minder materiaal benodigd, dus minder emissie en zeker ook minder kosten.

3.4 Overgangsconstructie B, van restaurant naar parkeergarage

De parkeergarage is zeer afhankelijk van de bovenliggende structuur en wordt als laatste beschouwd. Uit de vorige paragraaf bleek dat een kolommenstructuur voor de overgang van woningen naar een restaurant de meest voor de hand liggende optie is. Nu dient dit opnieuw bepaald te worden voor de overgang van de constructie van het restaurant naar een parkeergarage. Hierbij is de meest eenvoudige optie om de kolommen of penanten van de bovenliggende structuur direct door te zetten naar de fundering. Naast dat de belasting iets hoger wordt, is er verder geen invloed op geometrie en zal het ontwerp niet echt veranderen. Deze varianten worden verder niet nogmaals uitgewerkt, maar worden wel meegenomen in vergelijking van de varianten.

De voorkeur van de architect lijkt duidelijk te liggen bij het toepassen van penanten tussen de parkeervakken zoals in Bijlage B: Plattegronden en doorsnede architect te zien is. De kolommen kunnen echter een grote beperking leveren bij de beschikbare vrije ruimte voor parkeerplaatsen en de penanten maken, door de grote lengte die benodigd is, het zicht in de garage zeer beperkt. Daarom worden er in deze variantenstudie alternatieven beschouwd.

Op Figuur 17 zijn met blauw puntlasten uit de bovenliggende constructie weergegeven, indien voor de meest voor de hand liggende kolommenstructuur wordt gekozen bij overgang A. Hierbij is met de rode wolken aangegeven welke puntlasten voor de grootste problematiek zorgen bij het afdragen van de krachten naar de fundering. De groene lijn geeft de buitenlijn van het restaurant weer. De zwarte lijn is buitenrand van de parkeergarage.



Figuur 17: Puntlasten op de kelder

De puntlasten kunnen op verschillende manieren worden afgedragen naar de omliggende constructie. Een vrije overspanning kan op verschillende manieren gerealiseerd worden.

Deze opties worden in de volgende paragrafen behandeld:

- een massieve betonvloer;
- betonbalkenraster met betonvloer;
- stalen balkenraster met betonvloer;
- stalen-beton balkenraster met betonvloer;
- stalen vakwerkliggers met betonvloer.

Voor al van deze elementen geldt dat de basis ontwerpregels, waarin de gestelde hoogte afhankelijk is van de overspanning, niet afdoende zijn. Naast belasting uit de bovenliggende vloer, zijn er voor de meeste varianten enkel puntlasten over te brengen die in het midden van de overspanning staan.

3.4.1 Massieve betonvloer

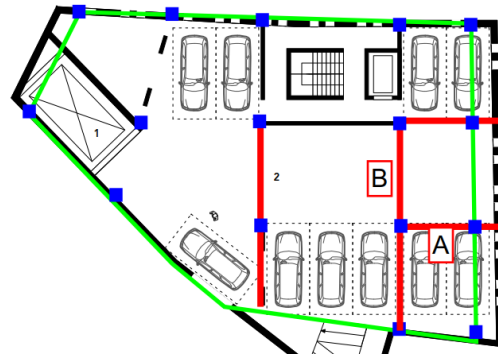
Allereerst wordt de benodigde vloerdikte op basis van pons berekend. Met name de maximale ponsweerstand is hierbij van belang. De maximaal toelaatbare spanning is $0.4 \cdot u \cdot f_{cd} = 0.4 \cdot 0.6 \cdot (1 - 30/250) \cdot 20 = 4.22 \text{ N/mm}^2$. Uitgaande van een β -factor van 1.15 is de minimale benodigde vloerhoogte:
$$h_{ben} = \frac{F_{ed}}{\sigma_{max} \cdot u_1} = \frac{1.15 \cdot 3900 \cdot 10^3}{4.22 \cdot (4 \cdot 500)} = 531 \text{ mm}.$$
 Met deze afmeting is er wel ponswapening nodig. Na vaststellen van de definitieve vloerhoogte wordt dit gecontroleerd.

Zoals eerder gesteld, geldt voor elementen op buiging een economisch en duurzaam wapeningspercentage, wat rond de 1% wapening aan de getrokken zijde betekent. Hiervoor is het zeer van belang dat het wapeningsmoment bepaald wordt. Om niet in een plaatberekening te verzanden, wordt hiervoor een sterk vereenvoudigde benadering gedaan voor de meeste simpele afdracht in een plaat, de afdracht met versterkte stroken zoals weergegeven in Figuur 18.

In Figuur 18 is de benadering voor de plaatberekening weergegeven. Met blauw zijn de puntlasten aangegeven die via de rode lijnen(versterkte stroken) worden afgedragen naar de randen van de constructie. Deze benadering lijkt veel op een balkenraster. Bij een balkenraster wordt echter geen gebruik gemaakt van alzijdige afdracht, waardoor de voordelen van een plaat niet volledig worden gebruikt. Daarom wordt het aandeel plaatwerking geschat op 25%, waardoor het uitgangspunt van 1% wapening wordt verminderd naar 0.75%.

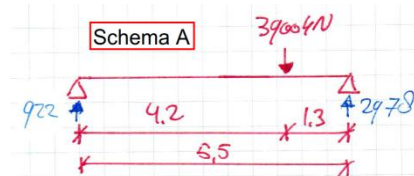
Voor de meewerkende breedte van een strook wordt de wapeningsbaan uit de GTB gehanteerd, waarbij enkel de vloer in ogenschouw wordt genomen. Bij een gerekende breedte van $2.5 \cdot h$ is de benodigde nuttige hoogte dan: $h^3 = \frac{M_{ed}}{13.74} =$

$$\frac{\frac{1}{4} \cdot 4850 \cdot 11.5 \cdot 10^6}{13.74} = 10.15 \cdot 10^8 \rightarrow h_{ben} = 1000 \text{ mm}$$

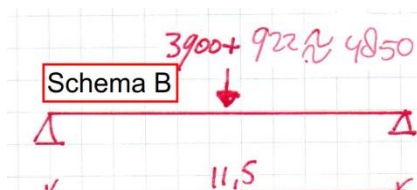


Figuur 18: Plaatbenadering met versterkte stroken

M_{ed} is hierbij ontstaan uit 2 puntlasten en een verwaarloosde lijnlast t.g.v. het eigen gewicht van de vloer. Zoals eerder berekend in de bovenliggende constructie, was de puntlast van een enkele kolom 3900kN. Door afdracht naar de rand van de constructie en een deel afdracht naar de versterkte strook, zorgt de dwarsbalk voor een extra verticale puntlast van: $1.3/5.5 \cdot 3900 = 922 \text{ kN}$ (zie ook Figuur 19).



Figuur 19: Schema A



Figuur 20: Schema B

Indien het eigen gewicht van de vloer even achterwege wordt gelaten, is de benodigde dikte (volgens het schema in Figuur 20):

$$h^3 = \frac{\frac{1}{4} \cdot 4850 \cdot 11.5 \cdot 10^6}{13.74} = 10.15 \cdot 10^8 \rightarrow h_{ben} = 1000 \text{ mm}$$

CO ₂ emissie totaal	935	kg/m
Kosten totaal	1380	€/m

Doordat er ontworpen is op een strook met een afmeting van 2500x1000mm zijn de CO₂ emissie en kosten weergegeven per strekkende meter.

Ponswapening

De eerste controle omtrek $U_1 = 500 \cdot 4 + 2 \cdot \pi \cdot (2 \cdot 950) = 2000 + 11940 = 13940$

De optredende spanning is dan: $v_{ed} = \beta \cdot \frac{v_{ed}}{u_1 \cdot d} = 1.15 \cdot \frac{3900 \cdot 10^3}{13940 \cdot 950} = 0.4 > v_{rdc}$. Er is dus ponswa-

pening nodig. Over de hele lengte komt dit neer op 50kg/m³/m extra wapening.

In deze beschouwing wordt enkel van krachten en belastingen in de uiterste grenstoestand uitgegaan. Aspecten als krimp en extra voorzieningen ten behoeve van het opwarmen van het beton tijdens de uitharding worden niet meegenomen in deze variantenstudie.

3.4.2 Balkenraster beton

Het balkenraster van beton is qua krachtafdracht zeer eenvoudig. Het raster komt overeen met de vereenvoudigde belastingafdracht van de massieve plaatvloer. De rode lijnen in Figuur 18 zijn nu echter balken met daartussen vloeren. Het maatgevende schema is gelijk aan Figuur 20. Het moment in de zwaarst belaste balk, ter hoogte van de schacht, is onveranderd ten opzichte van de vloerplaat 14000kNm.

Omdat, bij de analytische bepaling van de hoogte van de balk, de breedte lineair verwerkt is, kan de vergelijking uit paragraaf 3.4.1 vermenigvuldigd worden met de breedte van de balk ten opzichte van de hoogte. Bij een gerekende breedte van $0.5 \cdot h$ is de benodigde nuttige hoogte: $h^3 = \frac{M_{ed}}{2.75}$, bij een breedte van $1 \cdot h$ is de benodigde hoogte: $h^3 = \frac{M_{ed}}{5.5}$.

Een balk breder maken is minder efficiënt dan een balk verhogen, mits men puur kijkt naar het gebruik van beton. Echter, bij forse balkhoogtes van één meter en meer dient ook gekeken te worden naar de invloed op de rest van het gebouw. Het verschil tussen een balkhoogte van 1 meter of twee meter is, puur kijkend naar het betongebruik, veel minder ingrijpend dan de invloed op de rest van het gebouw. Een extra meter balkhoogte betekent voor alle elementen in de rondte van het gebouw een extra meter. Alle gevels, alle bekleding, alle afwerking, alles heeft een extra meter nodig. In sommige gevallen is het hoger maken van een balk dus veel duurder dan de balk breder. Dit ondanks dat het beton niet efficiënt gebruik wordt.

Naast kosten is ook de CO₂ emissie een essentieel onderdeel bij het hoger maken van de balk. Om een volledig beeld te krijgen van de CO₂ emissie van het gehele gebouw door de invloed van de hoogte, dient extra onderzoek gedaan te worden naar de emissie en kosten van bouwkundige onderdelen. Dat valt buiten de scope en deze onderdelen worden dus slechts vermeld in de overwegingen om een definitieve keuze te maken.

De maximaal toelaatbare dwarskracht heeft veel invloed op de geometrie. De maximale dwarskrachtcapaciteit ($V_{Rd,max}$) is niet op te hogen middels wapening. De maximaal optredende dwarskracht is $4850/2=2425$ kN. Voor het ontwerp en door het ontbreken van eigen gewicht wordt uitgegaan van 2750kN. Het minimaal benodigde betonoppervlak kan als volgt bepaald worden:

$$\frac{V_{ed}}{b \cdot h} \leq V_{Rd,max} \rightarrow b \cdot h \geq \frac{V_{ed}}{V_{Rd,max}} = \frac{3000 \cdot 10^3}{3.28} = 923077 \text{ mm}^2$$

Een balk van $1000 \cdot 1000$ zou dus voldoen. De maximale dwarskracht is dus niet maatgevend. De breedte en hoogte kan geoptimaliseerd worden op basis van het optredend moment en beperken van de hoogte.

Enkele mogelijke balkhoogtes voor de constructie zijn als volgt:

$$\text{Breedte} = 0.5 \cdot \text{hoogte: } h^3 = \frac{14000 \cdot 10^6}{2.75} = 50.9 \cdot 10^8 \rightarrow h_{ben} = 1800 \text{ mm} \quad A_c = 900 \cdot 1800 \cdot 10^{-6} = 1.62 \text{ m}^2$$

$$\text{Breedte} = 1.0 \cdot \text{hoogte: } h^3 = \frac{14000 \cdot 10^6}{5.5} = 25.5 \cdot 10^8 \rightarrow h_{ben} = 1400 \text{ mm} \quad A_c = 1400 \cdot 1400 \cdot 10^{-6} = 1.96 \text{ m}^2$$

$$\text{Breedte} = 1.5 \cdot \text{hoogte: } h^3 = \frac{14000 \cdot 10^6}{8.2} = 17.0 \cdot 10^8 \rightarrow h_{ben} = 1200 \text{ mm} \quad A_c = 1800 \cdot 1200 \cdot 10^{-6} = 2.16 \text{ m}^2$$

$$\text{Breedte} = 2.0 \cdot \text{hoogte: } h^3 = \frac{14000 \cdot 10^6}{11} = 12.7 \cdot 10^8 \rightarrow h_{ben} = 1100 \text{ mm} \quad A_c = 2200 \cdot 1100 \cdot 10^{-6} = 2.42 \text{ m}^2$$

In bovenstaande vergelijkingen is goed te zien dat, bij het breder worden van de balk, de nuttige hoogte gereduceerd wordt. De invloed van de breedte wordt wel steeds minder naarmate de balk breder wordt en het materiaal wordt steeds minder efficiënt gebruikt. Er wordt gekozen voor een enigszins beperkte balkhoogte van 1200mm, zodat de extra gebouwhoogte beperkt

blijft. Bij een grotere breedte wordt het ook lastig om alle wapening onderin de balk te mobiliseren zonder voorzieningen te treffen.

Omdat dwarskracht niet maatgevend is, heeft het ophogen van de betonkwaliteit weinig effect op de doorsnede hoogte. Een goed alternatief zou een voorgespannen betonbalk kunnen zijn. Dit maakt echter geen onderdeel uit van dit afstudeeronderzoek.

De hoeveelheid wapening aan de getrokken zijde is 1%, 78.5kg/m³. Maatgevend voor het negatief buigend moment is de toevallige inklemming van 15%, dat is meer dan het minimumwapeningspercentage. Daardoor is de benodigde wapening aan de bovenzijde 15% van de onderwapening.

De optredende dwarskracht is inclusief het eigen gewicht van de vloer en balk 3000kN. Door de breedte van de balk is er een 3-snedige beugel nodig daar 600mm de maximale beugelbeenafstand is volgens de Eurocode 1992-1-1, 9.2.2(8). Bij de huidige afmetingen is er een 3-snedige beugel Ø16-200 benodigd. Door de benodigde beugels en flankwapening zal de totale toegepaste wapening oplopen tot 140 kg/m³.

Liggers in het werk gestort			Liggers prefab		
CO₂ emissie totaal	873	kg/m	CO₂ emissie totaal	1280	kg/m
Kosten totaal	1085	€/m	Kosten totaal	1362	€/m

Door de grote afmetingen wordt prefab, naast kostbaar, ook steeds minder praktisch. De elementen zullen erg zwaar zijn, waardoor het minder handzaam is en transport en kraaninzet meer onder druk komt te staan.

3.4.3 Balkenraster staal

Voor het balkenraster van staal kan wederom het balkenraster van Figuur 18 worden gebruikt. Indien wordt ontworpen op doorbuiging, kan het volgende vergeet-me-nietje voor een puntlast

gebruikt worden: $\delta_{totaal} = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot EI}$ waarin $\delta_{totaal} = \frac{1}{250} \cdot l$, $E_s = 210000$ en $F = F_{bgt} =$

4850*181.5/230 = 3830kN. Voor het ontwerp en de invloed van eigengewicht wordt 4000kN aangehouden. Het maximaal optredend moment is net als bij de betonbalken

$\frac{1}{4} \cdot 4850 \cdot 11.5 = 14000 \text{ kNm}$. $I_{ben} = \frac{F \cdot l^2}{40320} = \frac{4000 \cdot 11000^2 \cdot 10^3}{40320} = 1.200.397 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$

Dergelijke profielen bestaan niet, waardoor het niet mogelijk is om deze constructie met een standaard stalen balk uit te voeren.

Het zwaarste profiel is een HEM1000 met een weerstandsmoment van 14331. Twee HEM1000 profielen zouden een momentweerstand bieden van 14331/12895*11866=13184, dit is niet voldoende.

Andere opties waarin stalen liggers als puur buigende elementen worden ingezet, worden niet realistisch geacht. Daarom wordt een staalvariant niet verder beschouwd.

Voor de volledigheid wordt nog wel de totale CO₂ emissie van een dergelijke constructie gecontroleerd. Het toepassen van 3xHEM800 zou voldoende moment weerstand bieden. Aangenomen wordt dat, indien 3xHEM800 als samengesteld

CO ₂ emissie liggers (3x HEM800)	465	kg/m
CO ₂ emissie brandwerende bekleding	120	kg/m
CO₂ emissie liggers	585	kg/m
Kosten liggers	1841	kg/m
Kosten brandwerende bekleding	225	kg/m
Kosten liggers	2066	€/m

profiel worden geproduceerd, dat deze niet meer gevoelig is voor kip.

Er is in dit geval als uitgangspunt gebruikt dat het mogelijk is om de kracht over 3 liggers te spreiden. In de definitieve uitwerking zal er veel aandacht besteed moeten worden aan deze detaillering. Tevens zullen er extra kosten en emissie zijn voor het onderling bevestigen van de verschillende liggers.

3.4.4 Balkenraster staal-beton

Uit de berekening van het balkenraster van staal en beton bleek al dat het erg lastig te realiseren is om de parkeergarage kolom-vrij te houden, als er een puntlast in het midden van de overspanning staat zoals in schema B volgens Figuur 20. In deze paragraaf wordt beschouwd of het mogelijk is om dit in een staal-betonligger uit te voeren. Uit de staalberekening blijkt al dat er meerdere liggers nodig zijn. Allereerst wordt gecontroleerd of de deuvels maatgevend zijn. Door de grote profielen zal de meewerkende breedte van het beton bepalend zijn. Met als uitgangspunt dat er twee liggers worden toegepast, is de meewerkende breedte per ligger $L \cdot 2 \cdot 8/2 = 1438 \text{ mm}$. $V_{led} = 1438 \cdot 300 \cdot 20 \cdot 0.85 \cdot 10^{-3} = 7334 \text{ kN/per ligger}$. Bij een standaard deuvelcapaciteit van 57kN, zijn er dus $7334/57 = 130$ deuvels per ligger helft benodigd. Met een overspanning van 11.5m en aan beide zijden van het lijf een deuvel, geeft dat een hart op hart afstand van $5750/130/2 = 85 \text{ mm}$. Dat is een erg kleine afstand, maar niet onmogelijk. Een alternatief is het oplassen van stalen elementen zoals bijvoorbeeld een stukje hoekstaal haaks op de ligger. Dat maakt het systeem echter minder ductiel, kost meer geld en de winst in staal constructie wordt steeds beperkter.

De grootste winst is te halen wanneer men ten opzichte van een staalprofiel terug zou kunnen van 3 naar 2 profielen. Voor de controle wordt daarom 2xHEM 1000 aangenomen. Bij dergelijke afmetingen zit de neutrale lijn altijd in het staalprofiel, de vraag is alleen of deze in de flens of het lijf zit. $N_s = A \cdot f_{yd} = 88800 \cdot 0.355 = 31524 > N_c = 7334 \cdot 2 = 14668 > N_{lijf} = (h_a - 2 \cdot t_f) \cdot t_w \cdot f_{yd} = (1008 - 2 \cdot 40) \cdot 21 \cdot 2 \cdot 0.355 = 13835$, waardoor de totale weerstand bepaald kan worden met basisgeval 2:

$$M_{pl,Rd} = N_c \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot h_a + h_p + \frac{1}{2} \cdot h_c \right) + \frac{1}{2} \cdot (N_s - N_c) \cdot \left(h_a - \frac{N_s - N_c}{2 \cdot b_a \cdot f_{yd}} \right)$$

$$= 14668 \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot 1.008 + 0 + \frac{1}{2} \cdot 0.3 \right) + \frac{1}{2} \cdot (31524 - 14668) \cdot \left(1.008 - \frac{31524 - 14668}{2 \cdot 2 \cdot 302 \cdot 0.355} \right)$$

$$= 9593 + 8498 = 18087 \text{ kNm} > 14000$$

Dat is ruim voldoende capaciteit waardoor het profiel nog verkleind kan worden tot een HEA1000. De capaciteit is dan 14395kNm.

De stalen ligger moet nog wel brandwerend bekleed worden.

Net als bij het stalen balkenraster is er, in dit geval, als uitgangspunt gebruikt dat het mogelijk is om de kracht over 2 liggers te spreiden. In de definitieve uitwerking zal er veel aandacht besteed moeten worden aan deze detaillering. Tevens zullen er extra kosten en emissie zijn voor het onderling bevestigen van de verschillende liggers.

CO ₂ emissie kolommen 2x HEA1000	261	kg/m
CO ₂ emissie brandwerende bekleding liggers	125	kg/m
CO ₂ emissie deuvels	45	kg/m
CO₂ emissie liggers	431	kg/m
Kosten kolommen 2x HEA1000	870	kg/m
Kosten brandwerende bekleding liggers	234	kg/m
Kosten deuvels	30	kg/m
Kosten liggers	1134	€/m

3.4.5 Staal vakwerk

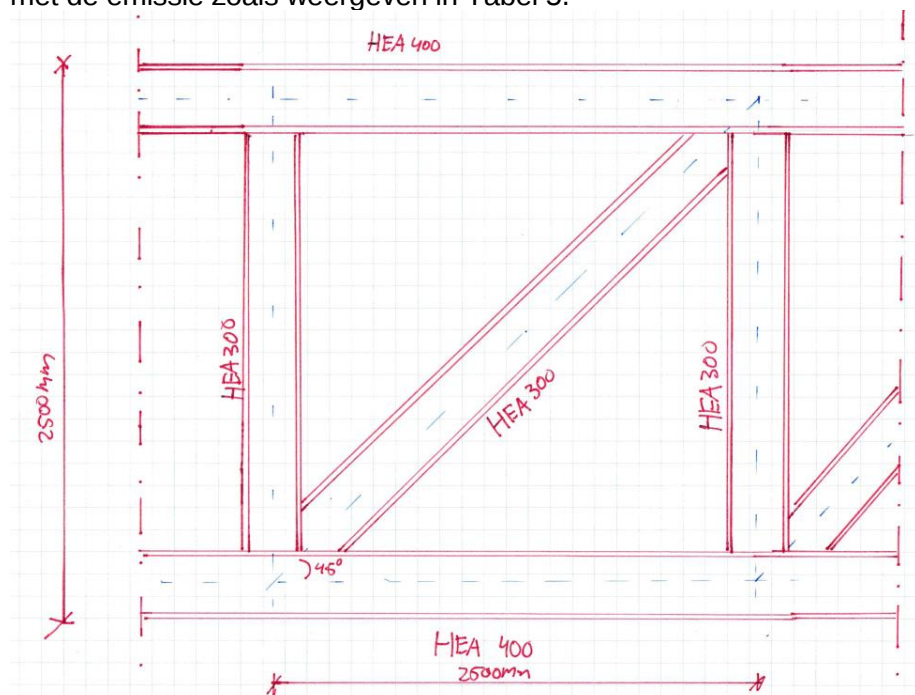
Bij een vakwerk op positieve buiging zijn doorgaans twee onderdelen bepalend, knik van de bovenregel en de stijfheid. Zoals in paragraaf 3.4.3 berekend, is de benodigde stijfheid van de constructie $1.200.397 * 10^4 mm^4$ en het maximaal optredende moment is 14000kNm. Tevens bleek uit dezelfde paragraaf dat profielen met een hoogte van 1 meter niet voldoen.

Voor een vakwerk met zulke grote momenten is het lastig de ontwerp vuistregels voor vakwerken te hanteren, waardoor gebruik is gemaakt van een spreadsheet die gedurende dit afstudeeronderzoek steeds verder is uitgebreid. Bij een vakwerk is de hoogte altijd bepalend voor de hoeveelheid materiaal en dus emissie en kosten. Doordat de beschikbare hoogte in de parkeerkelder beperkt is, zijn profielen van hoger dan 1 meter eigenlijk uitgesloten. Vanuit didactisch oogpunt is toch een vergelijk gemaakt bij een vakwerk met een hoogte van 2.5 meter, omdat dan de hoeveelheid benodigd materiaal veel minder is. Gevolgen, als extra verdiepingshoogte en de kosten en emissie, die dit met zich meebrengen, zijn niet meegenomen in de variantenstudie.

Voor het ontwerp is een hoek van de diagonalen aangehouden van 45 graden. Deze zou in de definitieve uitwerking nog geoptimaliseerd kunnen worden. Uit de berekening blijkt dat stijfheid niet maatgevend is, maar juist knik van de bovenregel en trek op de onderregel. Door de hoek van 45 graden zijn de theoretische kniklengtes kort, waardoor een knikfactor van 1.0 aangehouden wordt. Het resultaat is een vakwerk zoals geschetst in Figuur 21, met de emissie zoals weergegeven in Tabel 5.

kg staal/m		
Bovenligger	125	kg/m
Onderligger	125	kg/m
Diagonaal(onder hoek)	125	kg/m vakwerk
Verticaal=diagonaal	88	kg/m vakwerk
Kg Totaal per m	463	
CO ₂ emissie materiaal	222	kg/m
CO ₂ emissie verbindingen	20%	€/m
CO2 emissie totaal per m	267	€/m
Kosten materiaal	879	€/m
Kosten verbindingen	20%	€/m
Kosten vakwerk per m	1055	€/m

Tabel 5: CO2 emissie en kosten vakwerk



Figuur 21: Schets vakwerk

Voor de volledige berekening zie Bijlage G: Achtergrond gebruikte formules en spreadsheets.

3.4.6 Knelpunten en conclusie

Door te kiezen voor balkenraster is het knelpunt 3, zoals beschreven in paragraaf 3.1.2, relatief makkelijk op te lossen. De impact op de constructie van de kolomvrije parkeerkelder is veel groter. Hierbij is geen enkele variant een uitzondering. Eigenlijk zijn alle opties erg ingrijpend en totaal niet praktisch. De verdiepingshoogte moet sterk toenemen en het materiaalverbruik is enorm. Wel kunnen we in lijn van de overige variantenstudies de onderlinge vergelijking maken.

Als er enkel wordt gekeken naar de varianten in paragraaf 3.1.2 kan Tabel 6 worden gegenereerd voor de emissie en kosten per strekkende meter.

Varianten	CO ₂ (Kg)	Kosten(€)
Massieve betonvloer	935	1380
Balkenraster beton	873	1085
Prefabbeton	1280	1362
Staal	585	2066
Staal - vakwerk	267	1055

Tabel 6: Kosten en CO₂ emissie overgangsconstructie B

Hieruit blijkt dat een staalconstructie duurzaam is, maar ook zeer kostbaar. Een beter alternatief is een staal-beton structuur, waarbij de voordelen van staal en beton maximaal uitgenut worden. Een nadeel is dat, door de samenwerking de materialen moeilijker te scheiden zijn, waardoor hergebruik minder efficiënt is. In het werk gestort beton is, zoals bij elke variantenstudie, een goedkope optie, maar door de vertraging van de bouw geeft dit een vertekend beeld. Tot slot is de vakwerkconstructie veruit de duurzaamste en goedkoopste oplossing volgens deze variantenstudie, waarbij de kosten ook laag liggen. Door de grote constructiehoogte zijn er echter veel meer materialen nodig rondom het hele gebouw, waardoor de vergelijking scheef en onrealistisch is. Wel is duidelijk dat bij grote overspanningen, indien mogelijk, een vakwerkconstructie zeer economisch én duurzaam is.

Naast de kolomvrije kelder is er ook de mogelijkheid om de varianten van paragraaf 3.3 door te zetten naar beneden. De belasting op deze elementen neemt toe door de oplossing van het knelpunt met een balkenraster. Voor het vergelijk wordt daarom uitgegaan van 20% extra emissie en kosten bij deze varianten. De waarden uit Tabel 4 zijn daarom vermenigvuldigd met een factor 1.2 en staan in Tabel 7 onder het kopje varianten paragraaf 3.3.

De varianten uit paragraaf 3.4, Tabel 6, zijn per strekkende meter beoordeeld. Deze moeten met een factor 5.75 vermenigvuldigd worden om een vergelijk mogelijk te maken met een kolomliggerstructuur, waarbij de hart op hart afstand van de kolommen 5.75m is.

Totaal vergelijk	CO ₂ (Kg)	Kosten(€)
<i>Varianten paragraaf 3.4</i>		
Massieve betonvloer	5376	7935
Balkenraster beton	5020	6239
Prefabbeton	7360	7832
Staal	3364	11880
Staal - vakwerk	1535	6066
Staal-beton	2478	6521
	CO ₂ (Kg)	Kosten(€)
<i>Varianten paragraaf 3.3</i>		
i.h.w.g.	1583	3208
Prefab	2086	4393
Staal	1220	3628
Staal-beton	1099	2359
<i>Penanten</i>		
in het werk gestort	1751	2941
Prefab	2094	4409

Tabel 7: Totale vergelijking overgangsconstructies

De enige resultaten die ontbreken in Tabel 7, zijn die van de V- en K-kolommen. Deze zijn lastig te vergelijken met de andere varianten, omdat hier éénmaal een zware overgang is waarna een kolomvrije parkeergarage veel beter realiseerbaar is. Nog steeds zijn er voorzieningen als balkconstructies nodig in de parkeergarage, maar de emissies en kosten hiervan zullen veel lager liggen. Door de gereduceerde hoogte wordt er ook bespaard op bouwkundige invulling over de hoogte van het gebouw. Dit voordeel zet zich door op alle verdiepingen.

Het blijkt ook dat het doorzetten van kolommen of penanten in de kelder veel goedkoper en duurzamer is dan kolomvrije overspanningen. Het nadeel is dat deze elementen door de toenemende belastingen ook steeds groter worden en dus elke laag dikker wordt en meer ruimte in beslag neemt. Dit levert de grootste problemen op indien er daadwerkelijk voor een parkeergarage wordt gekozen, omdat de beschikbare vakken voor de auto's steeds kleiner worden.

Het mag duidelijk zijn dat de keuzes voor de bovenliggende constructies en varianten zeer bepalend zijn voor het totale beeld, de kosten en emissie. Het lijkt erop dat, bij het toepassen van een K-kolom op de eerste verdieping, de belasting direct gespreid is, waardoor er maar een enkele keer een forse constructie nodig is. Daarna kan de belasting per verdieping worden afgedragen en is een kolomvrije parkeergarage gecreëerd.

Een alternatief dat niet in beschouwing is genomen is een voorgespannen betonconstructie. Daarmee kan de geometrie gereduceerd worden en ook de wapening verminderd worden. Voor een vervolgonderzoek kan dat interessant zijn.

3.5 Conclusie ontwerptraject

In de ontwerpfase is zeer veel invloed uit te oefenen op de kosten en CO₂ emissie van een hoofddraagconstructie. Bij veel van de verschillende ontwerpen is een factor van ongeveer 2 terug te vinden tussen het meest duurzame en het minst duurzame ontwerp. Tevens is de factor 2 ook terug te vinden in de kosten.

Het is niet per definitie zo dat een duurder element ook duurzamer is. In het geval van prefab-beton zeker niet. Een staalconstructie daarentegen is vaak het meest duurzaam, maar ook de meest kostbare oplossing. Een uitzondering op een prefab geleverd element is de kanaalplaatvloer. Hierin wordt standaard gewerkt met delen betongranulaat en wordt de doorsnede volledig geoptimaliseerd. Daarom is een kanaalplaatvloer de goedkoopste en meest duurzame optie voor vloeren.

Een uitzondering op de factor 2 regel is de keuze voor een wandstelsel. Wanneer er naar wandstelsels wordt gekeken, is de invloed veel groter. Een kalkzandsteenwand heeft met een gemiddelde CO₂ emissie van ongeveer 46gk/m², factor 2.5, minder CO₂ emissie dan een holle wand stelsel. Dit terwijl het holle wand stelsel weer anderhalf keer goedkoper is dan een kalkzandsteenwand.

Bij de vergelijking van verschillende betonconstructies kan gesteld worden dat een goedkoop ontwerp ook een duurzaam ontwerp is, waarbij de invloed op de maatschappij dus minimaal is. Wanneer staal- of staal-beton constructies ook meegenomen worden in de beschouwing, blijkt al snel dat met meer kosten er een meer maatschappelijk verantwoord ontwerp ontstaat. Een uitzondering op bovenstaande is een constructie waarbij woningscheidende wanden benodigd zijn. Deze zijn absoluut niet duurzaam en wel kostbaar. Een beton- of kalkzandsteenwand biedt dan grote voordelen.

Voor het project aan het Doeleplein in Leeuwarden kan geconcludeerd worden dat een kalkzandsteen structuur met kanaalplaatvloeren de meest duurzame optie is. Hierbij zal gewerkt moeten worden met zo min mogelijk beton ten behoeve van de stabiliteitskern om de emissie en kosten zo laag mogelijk te houden. Daarnaast is een overgang met K-kolommen ter plaatse van het restaurant een goedkope en maatschappelijk verantwoorde keuze.

4 Uitwerking definitieve variant

Er is gekozen voor het uitwerken van de overgangsconstructie ter plaatse van het restaurant, voor een minimale betonkern zoals omschreven in paragraaf 3.5. Om de technische uitdaging op te hogen is, in plaats van K-kolommen, de stap naar een boogconstructie gemaakt. Met het oog op uitvoeringsaspecten en detaillering wordt dit uitgewerkt in prefabbeton om zo een hoogwaardig product te realiseren.

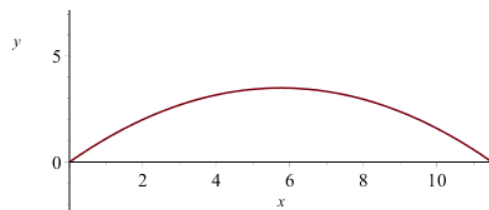
Daarnaast wordt er gebruik gemaakt van een betonkern en kalkzandsteenwanden. Om de CO₂ emissie en kosten van een betonwand zoveel mogelijk te beperken, wordt gezocht naar een minimale geometrie waarna de rest met kalkzandsteen kan worden opgebouwd.

4.1 Boogconstructie

Allereerst wordt met de huidige geometrie vanuit het ontwerp en het softwareprogramma Maple een inschatting gemaakt van de te verwachten krachtswerking en vervormingen. Aan de hand van de resultaten wordt een definitieve uitwerking en schematisering bepaald. Deze wordt afgestemd op de onder- en bovenliggende constructie en beschikbare ruimte in de parkeergarage.

4.1.1 Schatting dimensies en vervormingen

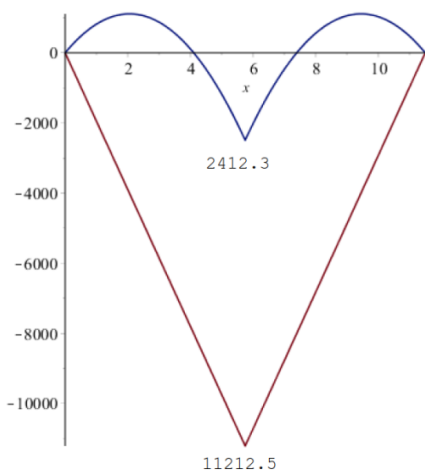
In Maple is de boog gemodelleerd in de vorm van een parabool met een overspanning van 11.5m en een hoogte van 3.5m zoals weergegeven in Figuur 22. De boog wordt beschouwd als 2-zijdig scharnierend opgelegd, om de invloed van de



Figuur 22: Boog in Maple

boogwerking te bepalen en om te controleren hoe groot de vervormingen zijn. Als de optredende vervormingen klein zijn ten opzichte van de boogvorm, kan, voor de wiskundige benadering van een boog, de extra vervorming van de boog genegeerd worden ten opzichte van de reeds gecreëerde vorm, waardoor relatief eenvoudige formules gebruikt kunnen worden.

Bij een ligger op 2 steunpunten is het maximale moment: $\frac{1}{4} \cdot F \cdot L = \frac{1}{4} \cdot 3900 \cdot 11.5 = 11212.5 \text{ kNm}$.



Figuur 23: Aandeel boogwerking

De geringe invloed van het eigen gewicht wordt voorlopig genegeerd. Door boogwerking wordt het maximaal op te nemen moment gereduceerd, afhankelijk van de hoogte van de boog én afhankelijk van de optredende vervormingen.

Bij een eerste beschouwing in Maple blijkt dat een groot deel van de belasting wordt afgedragen in de vorm van boogwerking/normaalkracht. Zie hiervoor Figuur 23, waar met de rode lijn is weergegeven wat de oorspronkelijke momentenlijn was en met blauw de optredende momentenlijn in de boog is gevisualiseerd. Met een eerste inschatting, waarbij een elasticiteitsmodulus van $10 \cdot 10^{-6} \text{ kN/m}^2$ en een betonoppervlak van $0.3 \cdot 0.6 = 0.18 \text{ m}^2$ is aangehouden, blijkt dat door boogwerking: $1 - 2492/11212 = 0.78 \rightarrow 78$ procent wordt afgedragen. De maximale zakking van de boog is daarbij 60mm.

Wanneer de betonvorm wordt aangepast naar 0.2*0.4m in doorsnede en een maximale hoogte van 2.5m en de elasticiteitsmodulus gelijk blijft, blijkt dat de invloed van boogwerking gelijk is, 78 procent, en dat de zakking toeneemt naar 320mm. De verandering in vervorming is dus groot, maar de krachswerking verschilt nauwelijks. De verandering in vervorming is makkelijk te verklaren, doordat het traagheidsmoment met een factor 5.4 afneemt, waardoor de zakking ook ongeveer dezelfde factor groter is. De afmetingen zijn dus nauwelijks van invloed op de krachswerking en het geheel kan als boog beschouwd worden, waardoor de optredende horizontaalkracht te bepalen is met vergelijking: $EI * \frac{d^4w}{dx^4} = q - H * \frac{d^2z}{dx^2}$ volgens [5], indien normaalkracht vervorming niet zou worden meegenomen. Door de grote krachten en vanuit didactisch oogpunt wordt dat echter wel meegenomen, waardoor de vergelijking 8c uit [5] wordt gebruikt: $\frac{H*L}{E*A} = - \int_0^L \frac{dz}{dx} * \frac{dw}{dx} dx$. In een later stadium kan door middel van een Moment-kromming diagram de optredende stijfheid van de betondoorsnede op verschillende plekken bepaald worden om tot meer nauwkeurige antwoorden te komen. Voorlopig wordt voor de krachswerking een constante EI aangehouden met een E-modulus van 10000N/mm², wat een conservatieve waarde is bij een doorsnede op druk.

Gebruikmakend van de eerder afgeleide formule is de benodigde hoogte van de boog:

$h^3 = \frac{2412*10^6}{13.74} = 1.76 * 10^8 \rightarrow h_{ben} = 559mm$. Het ontwerpuitgangspunt van 300x600mm kan wat betreft de optredende momenten dus in tact blijven.

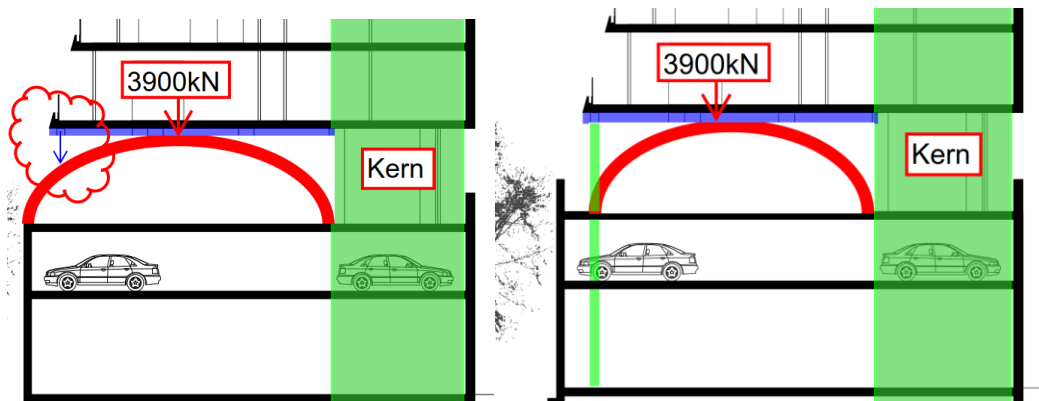
Naast een buigend moment is er ook een dwars-drukkracht aanwezig. De maximale dwarskracht van 1950kN zorgt voor een benodigd betonoppervlak van: $1950*10^3/7.72 = 252591mm^2$. Om enigszins een balkverhouding van 2:1 aan te houden, is de minimale afmeting 350x750mm. De betondrukspanning ten gevolge van de normaalkracht is $\frac{N_{ed}}{A_c} = \frac{4000*10^3}{350*750} = 15.2N/mm^2$ en lijkt goed opneembaar.

4.1.2 Uitgangspunten en randvoorwaarden

Belangrijk voor het bepalen van de geometrie van de boog zijn de randvoorwaarden waar deze mee te maken krijgt. Met randvoorwaarden wordt onder andere bedoeld op de beschikbare ruimte voor de oplegging, de beschikbare hoogte, de koppeling aan de omliggende constructieonderdelen (oplegcondities), maar ook de uitstraling. Niemand zit te wachten op een enorme boog door zijn restaurant.

Positionering boog

Voor de positie van de boog zijn er verschillende opties. Schematisch is in Figuur 24 weergegeven wat de mogelijke opties zijn. Bij de linker variant krijgt de boog te maken met een extra verticale kracht die zorgt voor een meer complexe krachswerking doordat de boog zijdelings kan gaan verplaatsen. Daarnaast ontstaan er extra momenten plus dwars- en normaalkrachten. Deze optie wordt als niet geschikt beschouwd, waardoor de rechter variant aangehouden zal worden. Hierbij sluit een kolom of penant aan op de boog, ter plaatse van de oplegging. Dit zal invloed hebben op de doorsnede-berekening bij de oplegging en dus detaillering van stekken en gains. Op de krachswerking en vervorming van de boog is de invloed zeer beperkt.



Figuur 24: Boogpositionering

Belastingen en krachtswerking

Voor de berekening wordt uitgegaan van een symmetrische boog met in het midden het aangrijpingspunt voor de kracht van 3900kN. Dit is een statistische belasting die niet van positie verandert. De verticale kracht zorgt voor momenten, normaal-, dwars- en horizontaalkrachten. In de berekening van de boogconstructie worden deze aspecten op sterkte en duurzaamheid (scheurvorming) getoetst aan de Eurocode 1992-1-1. In de berekening wordt rekening gehouden met de axiale vervorming van de boog.

Oplegcondities

Aan de bovenzijde wordt de boog als horizontaal beschouwd. Hierbij sluit de bovenzijde van de boog aan op een ligger die de vloerbelasting draagt. Aan de onderzijde steunt de boog op een balk die is geïntegreerd in de vloer die op zijn beurt weer is ondersteund door een penant of kolom in de parkeergarage. Eventueel zorgen de aansluitende elementen voor een rotatieveer die invloed heeft op de krachtswerking. In de uitwerking van de berekening wordt dit toegelicht.

Dragend element

Volgens NEN2443:2013, tabel 4B, is de huidige getekende parkeerindeling van de architect niet toegestaan. De rijbaanbreedte is te beperkt en de parkeervaklengte is te kort en wordt plaatselijk ook nog belemmerd door de inmenging van wanden. Daarnaast is er slechts 200mm ruimte gelaten voor een vierkante kolom aan het begin van het parkeervak wat een extra breedte toeslag van 0.15m geeft. Het verplaatsen van de kolom zorgt voor een breedtetoeslag van 0.5m.

Doordat het huidige ontwerp op allerlei wijzen niet voldoet, wordt er gekozen voor een penant die zo smal mogelijk is gedimensioneerd, maar wel voldoet aan de brandwerendheid en eisen op basis van sterkte en stijfheid. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de ontwerpregel voor penanten uit paragraaf 3.3.2 met een prefab penant:

$$\frac{N_{ed} \cdot l_0^2}{95.7 \cdot b^4 \cdot f_{cd}} \cdot b = \frac{(1950+1200) \cdot 10^3 \cdot 3000^2}{95.7 \cdot 250^4 \cdot \frac{55}{1.5}} \cdot 250 = 2.1 \cdot 250 = 517 \text{ mm. Penant: } 250 \times 550 \text{ mm.}$$

Uitvoering en transport

Een vrachtwagen kan maximaal 4.5x11m zijn en 30ton aan belasting dragen [6]. Het boogelement met een afmeting van 350*750mm en een systeemplengte van ongeveer 11 meter weegt ongeveer $0.35 \cdot 0.75 \cdot 2500 \cdot 11 = 7200 \text{ kg}$. Dit kan dus makkelijk vervoerd worden. Dit weegt ongeveer twee keer zoveel als de toegepaste breedplaten van 70mm dik met een lengte-breedte maat van 7.5*3m. Een aandachtspunt hierbij is dus de kraan capaciteit.

4.1.3 Boogvorm en vrije ruimte

Voor het ontwerp is gebruik gemaakt van een parabolische functie om de krachten in te schatten. Een parabool is echter niet de enige functie waarmee een boog berekend kan worden en zeker niet de enige vorm waarmee een boog gecreëerd kan worden.

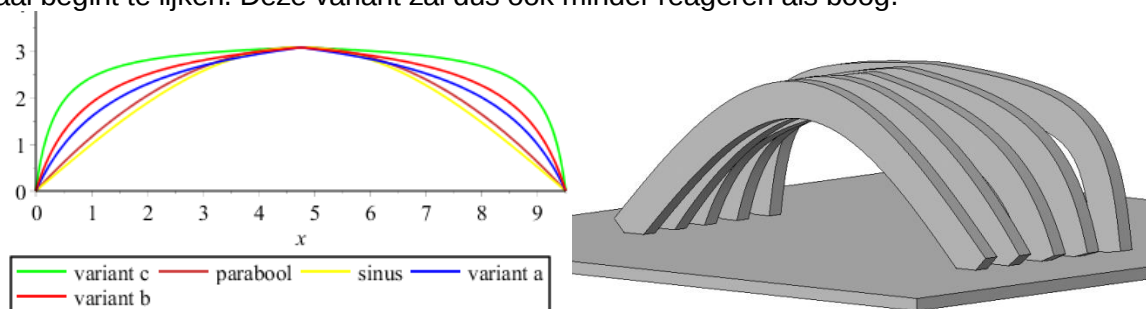
In een restaurant is de benodigde vrije hoogte bij een doorgang volgens Bouwbesluit tabel 4.21, 2.3m. Deze minimale maat kan invloed hebben op de boogvorm, maar ook op de verdiepingshoogte. Met de boogdoorsnedehoogte van 750mm, een geïntegreerde balkhoogte van 800mm en de vrije hoogte van 2300mm, is het minimale totale pakket ter plaatse van de doorgang $2300+750+800=3850\text{mm}$. Om een ruime doorgang te houden, wordt voor het ontwerp een verdiepingshoogte van 4250mm aangehouden. Dit betekent dat de hartlijn van de boog op $4250-375-800=3075\text{mm}$ zit.

Om in beeld te krijgen wat de invloed van de vorm van de boog is, wordt ook een berekening gemaakt van een enkele hyperbolen met de volgende vergelijking: $z(x) = \frac{p}{(x-q)} + r$. Deze hyperbool wordt vervolgens gespiegeld om de y-as ter plaatse van het midden van de overspanning. r, p en q zijn hierin variabelen die in Maple berekend worden aan de hand van de bekende punten:

- het begin van de hyperbool: (0;0)
- het bovenste punt van de hyperbool: (5.75;3.075)
- een variabel punt afhankelijk van de gewenste vorm: (a:1.5;2), (b:2;2.5) of (c:3.5;3)

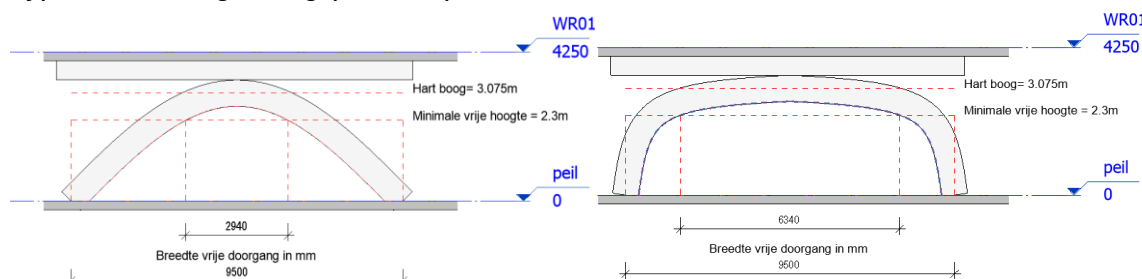
Tot slot wordt er ook nog een sinusvormige boog gemodelleerd.

Voor een duidelijk beeld van de invloed van de gekozen positie van het variabele punt, is in Figuur 25 weergegeven wat de verschillende boogvormen inhouden. Hierbij is goed te zien dat variant a het dichtst bij een parabool en sinus in de buurt komt en variant c meer op een portaal begint te lijken.



Figuur 25: Enkele mogelijke boogvormen

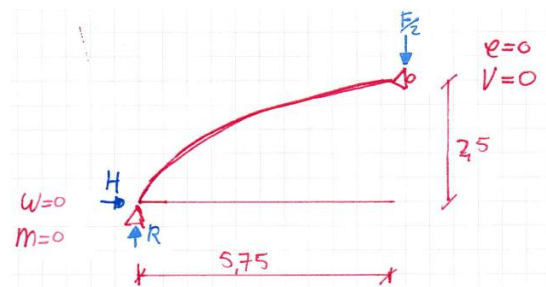
Voor de invloed op de vrije hoogte wordt de vrije breedte in kaart gebracht door Revit aan te sturen met Dynamo. Voor alle varianten wordt vervolgens de vrije hoogte opgemeten in Revit. Ter illustratie is in Figuur 26 weergegeven hoe hiermee is omgegaan bij een sinusvormige en hyperbool vormige boog (variant c).



Figuur 26: Vrije doorgang boog

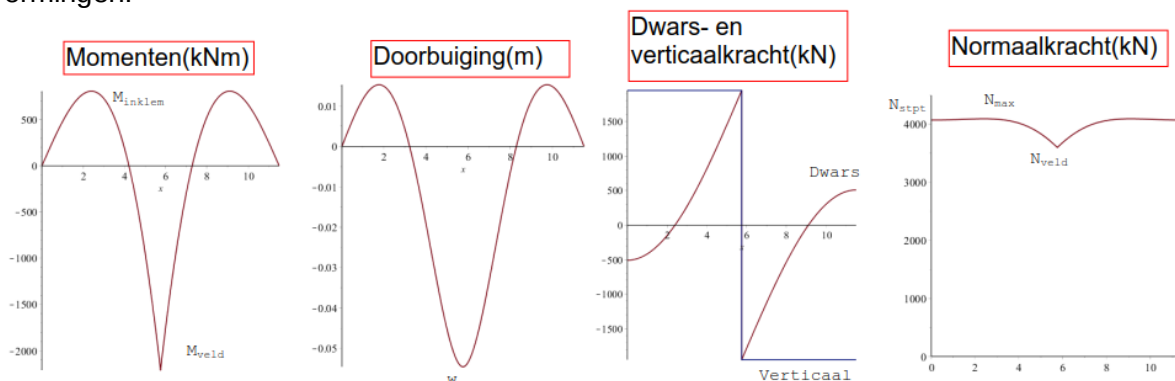
Bovenstaande varianten worden ook op basis van krachtswerking met elkaar vergeleken om een beter beeld te krijgen wat de invloed van de vorm is. Daarna zal een definitieve vergelijking volgen en conclusie worden gemaakt wat betreft de boogvorm.

Doordat Maple niet goed in staat blijkt om een gespiegelde hyperbool te integreren, wordt de boog uitgerekend als een halve boog die volledig symmetrisch is. In Figuur 27 is weergegeven wat de schematisering en randvoorwaarden voor de berekening dan inhouden.



Figuur 27: Schematisering halve boog

Om inzicht te geven in de optredende krachtswerking van een boog is in Figuur 28 een overzicht gegeven van de optredende krachtswerking en vervormingen.



Figuur 28: Berekende onderdelen boogvarianten

De berekeningsresultaten en vrije doorgang van de verschillende varianten zijn hieronder in Tabel 8 weergegeven.

Variant	Vrije doorgang(mm)	M_{veld} (kNm)	M_{inklem} (kNm)	Boogwerking(%)	H-kracht(kN)	$N_{ed,stp}$ (kN)	$N_{ed,veld}$ (kN)	$N_{ed,max}$ (kN)	$V_{ed(haaks)}$ (kN)	w_{max} (mm)
Sinus	2940	1828	-666	80%	2418	-3085	-2418	-3105	356	14
Parabool	3260	2093	-867	77%	2332	-2967	-2332	-3040	653	21
A	3410	3044	-1910	67%	2690	-2783	-2965	-3322	1362	43
B	4370	3310	-2192	64%	2325	-2470	-2521	-3034	1501	55
C	6340	3803	-2750	59%	1909	-2143	-1995	-2729	1688	82

Tabel 8: Berekeningsresultaten boogvarianten

Uit tabel 8 blijkt heel duidelijk dat een sinus- en paraboolvormige boog voor een groot deel als boog functioneren. Naarmate hier meer van wordt afgeweken, neemt het veld- en inklemmingsmoment flink toe. Variant C, die al meer de vorm van een portaal heeft, functioneert zoals verwacht ook voor een deel zo, omdat het steunpunt en veldmoment naar elkaar toetrekken. Er is nog 59% boogwerking, waardoor er nog steeds een sterke reductie is op de optredende momenten. Het verschil in het maximale veldmoment is ongeveer een factor 2 terwijl het inklemmingsmoment met een factor 4 toeneemt. Daarnaast zitten grote afwijkingen zitten in de toenemende dwarskracht ter plaatse van de oplegging bij hyperbolen. Bij variant C is deze 1688kN, terwijl deze bij een sinus 356kN is. Tot slot neemt de zakking van variant C ook toe met een factor van bijna 6 ten opzichte van de sinusvormige boog.

Het grootste voordeel van een portaalachtige vorm is de grote vrije doorgang. Daarnaast is de kleinere H-kracht die ontstaat gunstig voor de scheurvorming in de trekband. Grootste nadeel zijn de toenemende momenten en dwarskrachten waardoor de betonvorm groter moet worden en er meer wapening benodigd is.

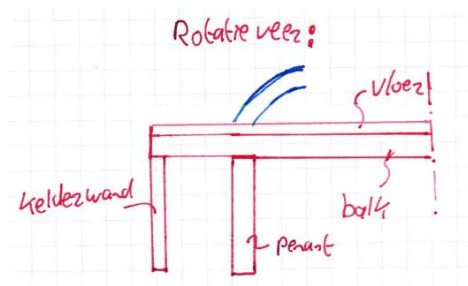
De verwachting is dat het meer economisch en duurzamer is om de vorm van de boog te optimaliseren en dus de momenten en dwarskrachten klein te houden, waarna de trekkracht vervolgens opgenomen wordt met wapening in de betonvorm die reeds aanwezig is. Daarnaast is het voor de uitstraling ook mooi om een slanke boog te hebben. Er wordt dus gekozen voor een sinusvormige boog.

4.1.4 Berekening

In deze paragraaf wordt de boog berekend op sterkte, stijfheid en stabiliteit. Eerst wordt de invloed van een eventuele inklemmingsveer bepaald, waarna de definitieve schematisering en krachtwerving naar voren komt. Tot slot wordt de boog op sterkte en de aansluitende constructie op sterkte en scheurvorming gecontroleerd.

Inklemmingsveer

Tot nog toe zijn de verschillende boogvarianten steeds beschouwd als een boog die is opgelegd op 2 scharnieren. De invloed van de ondersteunende penant en aansluitende vloer (2-zijdig) en balk (2-zijdig) zijn hierin nog niet meegenomen. Deze 5 onderdelen zijn weergegeven in Figuur 29 en berekend in Tabel 9. Voor alle 5 afzonderlijke onderdelen is het uitgangspunt dat deze aan hun uiteinde scharnierend zijn opgelegd, waardoor voor alle onderdelen geldt dat de rotatiestijfheid gelijk is aan $k_r =$



Figuur 29: Aspecten rotatiestijfheid

$$\frac{3 \cdot EI \cdot 10^{-9}}{L \cdot 10^{-3}}$$
 Voor de E-modulus van beton wordt een aanname gedaan voor buigende elementen: 10000N/mm² en voor op druk belaste elementen 25000N/mm². Omdat het lastig is om een groot deel van de vloer te mobiliseren, wordt aan beide zijden van de balk slechts 250mm, gelijk aan de vloerdikte, meegerekend. Tevens wordt de samengestelde balk niet als een geheel beschouwd omdat de invloed van de vloer beperkt is.

Onderdeel	h(mm)	b(mm)	E-modulus(N/mm ²)	Traagheidsmoment(mm ⁴)	Lengte	Rotatiestijfheid(kNm)	
Penant	550	250	25000	3,47E+09	3000	86654	
Balk links	600	300	10000	5,40E+09	2000	81000	
Balk rechts	600	300	10000	5,40E+09	9500	17053	
Vloer links	250	500	10000	6,51E+08	2000	9766	
Vloer rechts	250	500	10000	6,51E+08	9500	2056	
					Totaal	196528	kNm

Tabel 9: Berekening rotatie stijfheid

De rotatiestijfheid van de veer is dus: 196528kNm. Het optredende moment op die plek in de doorsnede is dus $M_{\text{inklemming}} = \pm 196528 \cdot \text{hoekverdraaiing} (\varphi)$.

Voor de berekening worden er nu 3 mogelijkheden vergeleken in Tabel 10:

1. sinusvormige boog op 2 scharnieren;
2. sinusvormige boog op 1 scharnier en 1 verend ingeklemde zijde;
3. sinusvormige boog 2-zijdig verend ingeklemd.

Variant	$M_{\text{veld}}(\text{kNm})$	$M_{\text{rotatieveer}}(\text{kNm})$	$M_{\text{inklem}}(\text{kNm})$	Boogwerking(%)	H-kracht(kN)	$N_{\text{ed,stpl}}(\text{kN})$	$N_{\text{ed,veld}}(\text{kN})$	$N_{\text{ed,max}}(\text{kN})$	$V_{\text{ed(haaks)}}(\text{kN})$	$w_{\text{max}}(\text{mm})$
1	1828	0	-666	80%	2418	-3085	-2418	-3105	356	14
2	1795	256	-567/-710	81%	2470	-3103/-3141	-2470	-3164	412/375	13
3	1748	308	-604	81%	2544	-3174	-2544	-3205	447	13

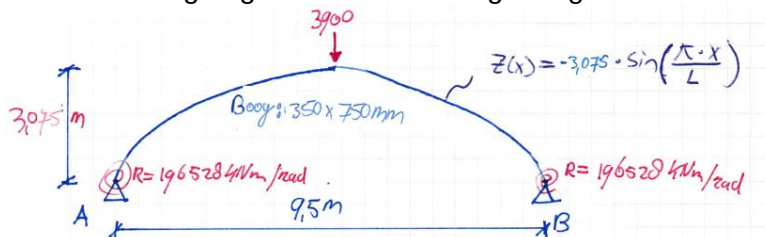
Tabel 10: Varianten inklemmingsveer

De invloed van de inklemming is dus niet bijzonder groot. Er ontstaat een steunpuntsmoment, de boogwerking verbetert in lichte mate en de H-, normaal- en dwarskrachten nemen toe. De vergrote resulterende H-kracht en het inklemmingsmoment werken negatief voor de aansluitende constructie. Toch is het lastig om een verbinding in een betonconstructieverbinding volledig scharnierend uit te voeren. Daarom wordt vanaf nu gerekend met variant 3. Dit geeft de meest ongunstige resultaten met uitzondering voor de optredende momenten in de boog.

Schematisering

Uit een vergelijkingsstudie van de heer Welleman [5] blijkt dat de berekeningsmethode met Maple zeer nauwkeurig is. De resultaten met een raamwerk- of EEM programma zijn vergelijkbaar. Maple reageert iets stijver, waardoor vervorming goed in de gaten gehouden moeten worden. De vervormingen van de bij dit project gekozen boog zijn, met 0.01mm, echter zeer beperkt, waardoor de afwijkingen hierin te verwaarlozen zijn. Een ander aandachtspunt is de axiale vervorming. Bij grote axiale vervormingen zijn niet-lineaire berekening nodig. Ook deze zijn beperkt, waardoor de Maple software geschikt is voor het bepalen van de krachtswerking in de boog.

De definitieve schematisering, van een volledige boog is als weergegeven in Figuur 30. Hierin is nu ook het eigen gewicht van de boog meegenomen.



Figuur 30: Definitieve schematisering boog

Berekening

De berekening met de aangepaste afmetingen geeft de resultaten voor momentverloop, doorbuiging, normaal- en dwarskracht zoals weergegeven in Figuur 31. Hierin is goed te zien dat, ter plaatse van de maximale momenten, de dwarskracht gelijk is aan nul. Dat is een aspect dat de juistheid van het model bevestigt. Voor de volledige invoer van de berekening in Maple zie Bijlage H: Invoer rekensoftware.

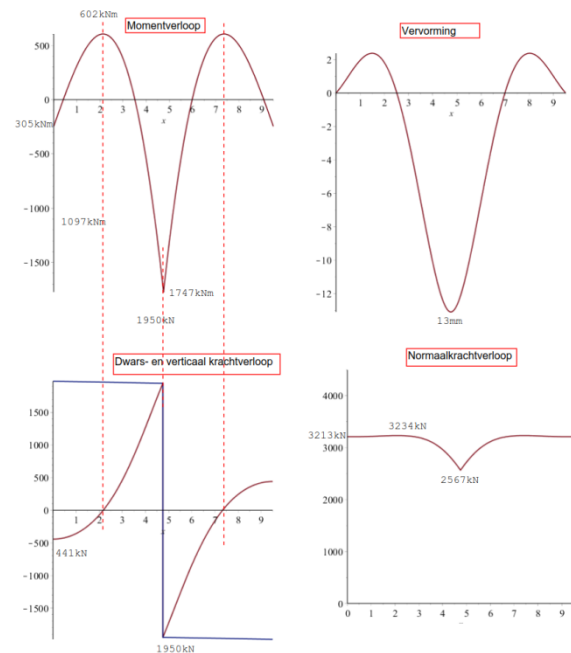
Controle dwarskracht

De maximaal optredende dwarskracht is 447kN ter plaatse van de oplegging. Te midden van de overspanning is er een dwarskracht gelijk aan de kolomkracht/2= 1950kN. De maximaal opneembare dwarskracht van de doorsnede bij een hoek van 45 graden en C55/67 beton is $7.72 * 750 * 350 * 10^{-3} = 2026kN > 1950$, dus de ligger voldoet op dwarskracht zonder beugels.

Controle M-N-kappa

Tot nog toe is er met handsommen gecontroleerd of de boog de druk en buigspanning kan opnemen. Er kan op verschillende plaatsen in de boog een M-N-Kappa diagram gemaakt worden. Dit wordt uitgevoerd aan de hand van Technosoft. De toets wordt uitgevoerd op drie karakteristieke punten:

- 1: ter plaatse van het maximale veldmoment; $M_{ed}=1747kNm$, $N_{ed}=-2567kN$;
- 2: ter plaatse van de rotatieveer; $M_{ed}=305kNm$, $N_{ed}=-3213kN$;



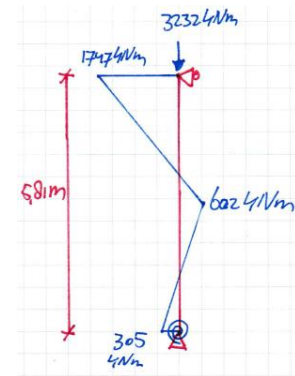
Figuur 31: Definitieve krachtswerking boog

3: ter plaatse van de maximale normaalkracht; $M_{ed}=602\text{kNm}$, $N_{ed}=-3224\text{kN}$.

Hierin zijn geval 1 en 3 de maatgevende belastingcombinaties. Belastingcombinatie 3, ter plaatse, blijkt goed opneembaar zonder wapening, dat geldt ook voor de voet van de boog. Voor deze positie wordt dus enkel praktische wapening opgenomen. Belastingcombinatie 1 is lastiger opneembaar door het grote optredend moment. De benodigde wapening is per zijde $6\text{Ø}32(4824\text{mm}^2)$, verdeeld over twee lagen. De maximale wapeningsverhouding bij een buigend element C55/67 is 0.03 (6962mm^2) wordt niet overschreden.

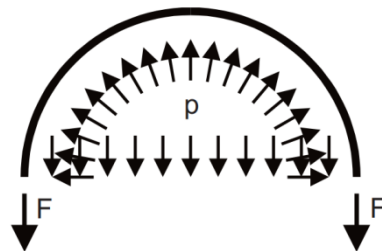
Knik

Naast een doorsnede toets is ook knik van de boog van belang. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van Technosoft kolomwapening. De lengte van de kolom wordt in Maple berekend met de volgende vergelijking: $L = \int_0^{L/2} \sqrt{1 + \text{diff}(z, x)^2} dx = 5.81\text{m}$. De normaalkracht en momenten worden ingevuld zoals verkregen uit de Maple berekening. Dit heeft de schematisering van Figuur 32 tot gevolg. Door de stijve inklemming kan de kniklengte gereduceerd worden tot $0.7 \cdot L = 4.1\text{m}$. Hieruit blijkt dat de wapening niet op te nemen is in de



Figuur 32: Schematisering knikcontrole

huidige betonvorm, omdat het maximale wapeningspercentage wordt overschreden. De betonvorm dient te worden vergroot tot $400 \times 750\text{mm}$. Eventueel zou de wapening ter plaatse van het maximaal moment verminderd kunnen worden tot $5\text{Ø}32$ in één laag. De tussenruimte is dan 43mm , wat niet praktisch is voor het storten, waardoor het oorspronkelijke ontwerp van toepassing blijft.



Uitbreken gebogen wapening op trek

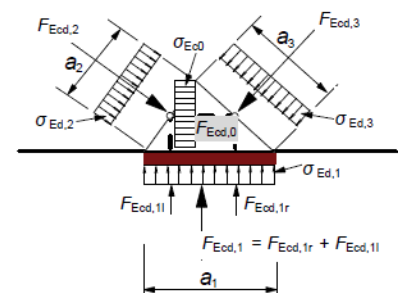
Doordat de wapening gebogen is en op trek staat, ontstaat er een neerwaarts gerichte q-last die te berekenen is met de ketelformule. $Qp = 8 \cdot F \cdot z / l^2 = 8 \cdot (1050 + 939) \cdot 2.8 \cdot 10^{-3} / 9.5^2 = 494\text{kN/m}$. Hierbij is voor de kracht uitgegaan van de M-N-Kappa berekening. Deze belasting kan worden opgenomen

Figuur 33: Achtergrond ketelformule

door middel van beugels die de kracht "ophangen" aan de bovenzijde van de boog met een benodigd beugeloppervlak van $494 \cdot 10^3 / 435 = 1135\text{mm}^2/\text{m}$. Een drie-snedige beugel $\text{Ø}12-300$ is afdoende. Vanuit praktisch oogpunt kan ook gekozen worden voor een twee-snedige beugel $\text{Ø}16-300$.

Knoopcontroles

Naast wapening dient ook de betonspanning gecontroleerd te worden ter plaatse van de aansluitingen. Dit gebeurt aan de hand van knoopcontroles volgens Eurocode 1992-1-1 paragraaf 6.5.4. Aan de bovenzijde bevindt zich een CCC-knoop met 2-assige druk. De maximale capaciteit van de knoop is: $k_1 \cdot v' \cdot f_{cd} = 1 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \cdot \frac{30}{1.5} = 1 \cdot 0.88 \cdot 20 = 17.6\text{N/mm}^2$. Met de puntlast van 3900kN is er dus een benodigd oppervlak van $3900 \cdot 10^3 / 17.6 = 221591\text{mm}^2$. Met de breedte van 400mm komt dat neer op een lengte van $221591 / 400 = 554\text{mm}$. Doordat de boog onder een balk wordt bevestigd, is dat goed realiseerbaar. Wel is het van belang dat de bovenliggende balk dezelfde breedte heeft en nauwkeurig wordt afgestort over een lengte van minimaal 554mm .



Figuur 34: CCC-knoop

De onderknoop, waar in één richting een op trek verankerde staaf aanwezig is, heeft minder capaciteit namelijk: $k_2 * v' * f_{cd} = 1 * \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) * \frac{30}{1.5} = 0.85 * 0.88 * 20 = 16.5 \text{ N/mm}^2$. Daarnaast is de oplegkracht ook kleiner, namelijk: 1987kN. Het beschikbaar oppervlak is hierbij gelijk aan de doorsnede van de boog: 400*750mm. De oplegspanning is daardoor $1987*10^3/(400*750)=6.6 \text{ N/mm}^2 < 16.5$. Ter plaatse van de oplegging aan de linkerzijde is er ook een verticale kracht vanuit de kolom. Deze zorgt voor een additionele spanning van 6.6 N/mm^2 . De totale spanning van $13.3 \text{ N/mm}^2 < 16.5 \text{ N/mm}^2$ is dus opneembaar.

Scheurvorming

De horizontaalkracht die aangrijpt bij de oplegging is in de uiterste grenstoestand 2567kN. De benodigde wapening is dan minimaal: $2567*1000/435=5901 \text{ mm}^2$. Dat komt overeen met 8Ø32 of 12Ø25. Voorlopig wordt gekozen voor 8Ø32. Doordat het een trekkracht betreft die centrisch op de balk aangrijpt, is er geen sprake van een maximaal wapeningspercentage. Dat geldt enkel voor elementen op buiging, waarbij de drukzonehoogte beperkt is om rotatiecapaciteit te behouden. Daarbij is waarschuwend gedrag van de constructie van belang. Indien een balk op trek gaat bezwijken, zal deze eerst waarschuwen door grote scheurvorming.

Voor het berekenen van de scheurwijdte kan gebruik worden gemaakt van Eurocode 1992-1-1 hoofdstuk 7.3: scheurbeheersing. Een alternatief is het rekenen aan scheurvorming volgens het trekstaaf model zoals door de normcommissie goedgekeurd in Varce 10. De belasting waarbij scheurvorming meegerekend wordt, is gelijk aan de permante belasting*1.0 + veranderlijke belasting* Ψ_1 . Dit staat voor deze trekband gelijk aan $2567*0.68=1746 \text{ kN}$.

De scheurwijdte w_k volgens het trekstaafmodel bij lang duur is gelijk aan:

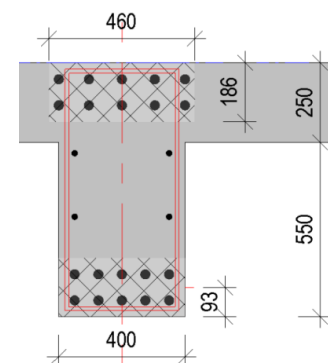
$$w_k = \frac{\sigma}{4 * \rho} * \left[\sigma_s - 0.3 * \frac{f_{ctm}}{\rho} * (1 + \rho * \alpha_e) + (\epsilon_{cs} * E_s) \right] * \frac{1}{E_s} = 0.89 \text{ mm}$$

Deze vergelijking is uitgewerkt in Bijlage G: Achtergrond gebruikte formules en spreadsheets. De toegestane scheurwijdte van 0.4mm wordt dus overschreden.

Een zeer bepalende factor in deze vergelijking is de ρ -factor. Deze kan gestuurd worden door de gerekende betondoorsnede of de wapening aan te passen. Als de wapening enkel in de boven- en onderzijde van de balk wordt opgenomen, kan de effectieve betondoorsnede gereduceerd worden.

De benodigde buig-trekwapening per zijde is ongeveer 3200 mm^2 . Als hier de helft van de trek-wapening per zijde aan wordt toegevoegd, is er per zijde $3200+5901/2=6151 \text{ mm}^2$ benodigd. Dat staat gelijk aan 8Ø32, maar wordt opgehoogd tot 10Ø32 per zijde, wat in 2 lagen in een balk met een breedte van 400mm weg te leggen is. De tussenruimte tussen de staven is dan 42mm wat groter is dan: $\emptyset$ en korreldiameter+5, dus akkoord. Aan de bovenzijde kan dit problemen opleveren voor de trilnaad, maar daar kunnen de buitenste staven ook buiten de beugel worden ge-

plaatst om wat extra ruimte te creëren. Het gebied dat nu op trek staat ten behoeve van de scheurwijdteberekening, $A_{c,eff}$ is nu veel kleiner. Voor een toelichting van de wapening positionering en het gebied op trek, zie Figuur 35. Bij het bepalen van deze opzet is gebruik gemaakt van figuur 7.1c uit Eurocode 1992-1-1.



Figuur 35: Schets balkwapening

De nieuwe berekening van de scheurvorming heeft een aangepaste waarde voor $A_{c,eff} = 460 \cdot 186 + 460 \cdot 186 = 154560$ en dus ook voor wapeningsverhouding $\rho = 12 \cdot \frac{804}{154560} = 0.062$

$$w_k = \frac{32}{4 \cdot 0.06} \cdot \left[226 - 0.3 \cdot \frac{4.2}{0.06} \cdot (1 + 0.06 \cdot 11.7 + 0.0011 \cdot 200000) \right] \cdot \frac{1}{200000} = 0.31 < 0.4.$$

Een aandachtspunt voor deze balk wordt de eventuele overlapping van de staven. Door de verankering lengte van 1077mm (zie voor berekening Bijlage G: Achtergrond gebruikte formules en spreadsheets) en het verankeren vanaf de dag van de oplegging, is de totale benodigde staaflengte $1.077 \cdot 2 + 9 = 11.15\text{m}$. Staven met een dergelijke lengte zijn leverbaar en transporteerbaar. Mocht dit niet praktisch zijn, dan is het van belang de overlappingen verspringend te laten verlopen om geen grindnesten te veroorzaken. Voor een goede verdichting is het ook aan te raden met een kleine korreldiameter van 16mm te werken.

Het is dus goed mogelijk om deze constructie af te wapenen in plaats van dat er alternatieve voorzieningen getroffen moeten worden. Alternatieven zijn er wel, zo kan bijvoorbeeld de balk worden voorgespannen of een stalen ligger ingestort worden om de trekkracht op te nemen.

Conclusie berekening

Doordat knik een onderbelicht onderdeel is geweest tijdens het ontwerp van de boog, voldeed het ontwerp niet helemaal aan de uiteindelijke vorm. De boog heeft extra breedte gekregen, zodat er voldoende wapening in de doorsnede kon worden opgenomen. Met uitzondering van het iets breder maken van de doorsnede, voldoet de boog op alle aspecten zoals gesteld in de Eurocode, kijkend naar sterkte, stijfheid en stabiliteit.

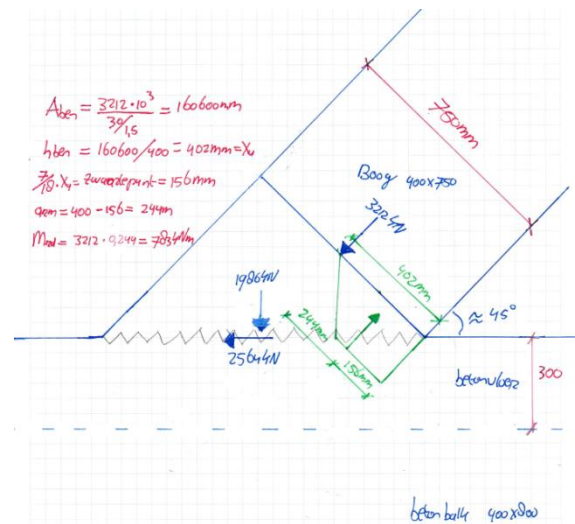
4.1.5 Detaillering

Het belangrijkste detail bevindt zich ter plaatse van de aansluiting van de voet van de boog. Hiervoor werd eerst onderzocht naar de mogelijkheid om de boog op verschillende manieren met de betonconstructie te verbinden. Een ongewapende aansluiting, waarbij de boog in zijn geheel geplaatst kan worden, is veruit het meest praktisch en economisch waardoor dit wordt onderzocht.

Bij de aansluiting spelen 2 aspecten een rol die hieronder zijn belicht.

Optredend moment

De normaalkracht in de boog ter plaatse van de voet is 3212kN. Deze kracht kan worden opgenomen in een beperkte drukzone ter plaatse van de aansluiting, waardoor er momentcapaciteit ontstaat. Het minimale oppervlak aan in het werk gestort beton dat benodigd is, is $N_{ed}/f_{cd} = 3212 \cdot 10^3 / 20 = 160600\text{mm}^2$. Door de breedte van 400mm is de benodigde hoogte 402mm. Het hart van deze kracht bevindt zich dan op $7/18 \cdot 402 = 156\text{mm}$ uit de zijde van de oplegging. De excentriciteit is $400 - 156 = 244$. De momentcapaciteit is dan: $3212 \cdot 0.244 = 785\text{kNm}$ wat groter is dan de 508kNm wat benodigd is ter plaatse van de voet, waardoor deze aansluiting op sterkte voldoet.



Figuur 36: Aansluiting boogvoet

Afschuiving

Een ander aspect is de afschuiving door de optredende horizontaalkracht. Deze kracht is 2564kN en moet door een aansluitvlak van $750 * \sqrt{2} * 400 = 424264 \text{ mm}^2$. Een schuifspanning van $2564 * 10^3 / 424264 = 6.04 \text{ N/mm}^2$. Voor de controle kan formule 6.25 uit Eurocode 1992-1-1 6.2.5 gebruikt worden: $V_{Rdi} = c * f_{ctd} + \mu * \sigma_n + \rho * f_{yd}(\mu * \sin(\alpha) + \cos(\alpha))$

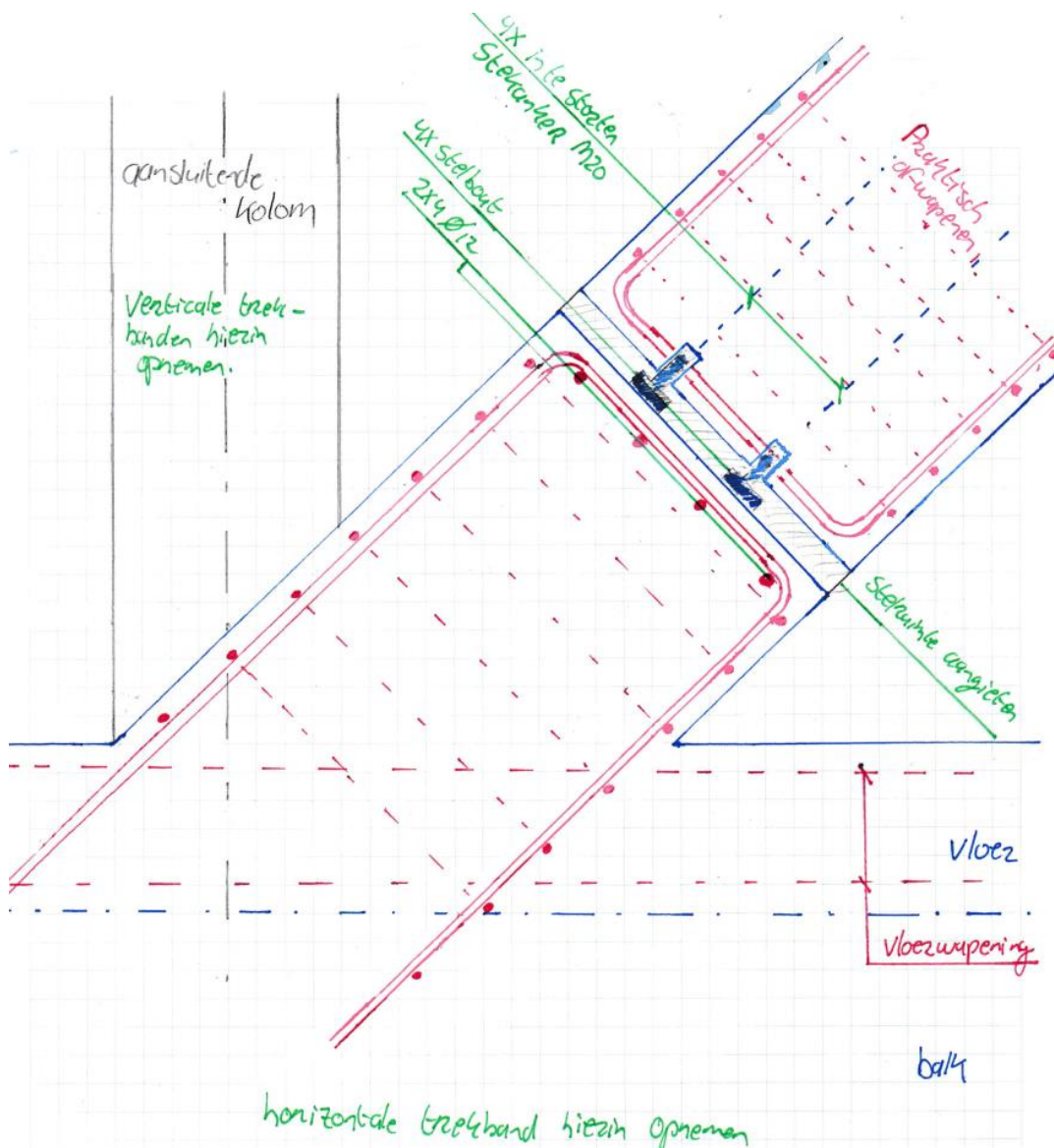
Uitgaande van een geprofileerd aansluitvlak geldt: $c=0.5$ en $\mu=0.9$.

Ongewapend levert dat de volgende capaciteit: $0.5 * 1.47 + 0.9 * \frac{1950 * 10^3}{424264} = 0.73 + 4.14 = \frac{4.87 \text{ N}}{\text{mm}^2}$.

Het blijkt dus dat er wapening nodig is in de doorsnede met een capaciteit van $6.04 - 4.87 = 1.17 \text{ N/mm}^2$. Met een hoek van 45 graden is de benodigde wapeningsverhouding:

$$\rho_{ben} = \frac{1.17}{f_{yd}(\mu * \sin(\alpha) + \cos(\alpha))} = \frac{1.17}{435(0.9 * \sin(45) + \cos(45))} = \frac{1.17}{584} = 0.002$$

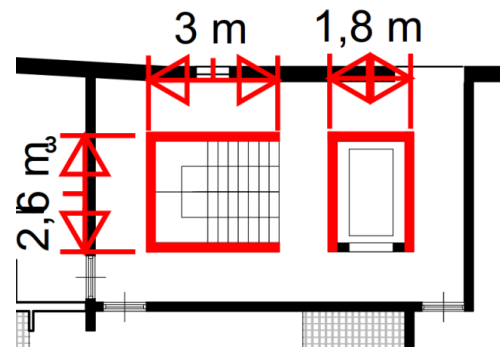
De benodigde wapening is dan $424264 * 0.002 = 850 \text{ mm}^2$. Dat betekent minimaal bijvoorbeeld 8Ø12 of 5Ø16 en is erg goed opneembaar. Wel moet het detail iets worden aangepast om de wapening ook daadwerkelijk te kunnen activeren, zodat de wapening ook krachten kan opnemen. Tevens moet er nog rekening worden gehouden met de aansluitende kolom met een afmeting van 400x400mm. Voor de schets zie Figuur 37.



Figuur 37: Wapeningsdetail boogvoeg

4.2 Stabiliteitskern

In het kader van een duurzame en goedkope constructie is in de definitieve uitwerking gekozen voor een kalkzandsteen draagsysteem met een boog als overgangsconstructie. De stabiliteit wordt daardoor opgelost door middel van een stabiliteitskern. Om het betongebruik te minimaliseren, wordt onderzocht of het mogelijk is enkel de lift- en trapschacht hiervoor te gebruiken. De omliggende kern wordt dan uitgevoerd in kalkzandsteen. Zie Figuur 38 voor een specificering van de gebruikte onderdelen met betrekking tot stabiliteit.



Figuur 38: Stabiliteitskern beton

De ontwerp-vuistpregels schrijven een verhouding voor van ongeveer 1:5 voor de lengte van de kern ten opzichte van de hoogte van het gebouw. Daar wordt hierbij niet aan voldaan. Het is interessant om te onderzoeken of dit met veel minder beton mogelijk is. Indien dat niet haalbaar blijkt, zijn de alternatieven: de betonkern uitbreiden naar de omliggende wanden of de omliggende wanden van kalkzandsteen, die verticaal wel enigszins belast worden, mee te laten werken in het opnemen van de horizontaalkrachten.

4.2.1 Uitgangspunten

Voor de afmetingen van de kern worden de afmetingen van Figuur 38 gehanteerd. De windbelasting is bepaald op basis van Eurocode 1992-1-4 tabel NB.5. De locatie, Leeuwarden, bevindt zich in windgebied twee. Voor de hoogte is 32 meter gehanteerd en door de hoogte van het gebouw wordt de locatie als onbebouwd beschouwd. De resulterende extreme stuwdruk, zonder veiligheidsfactoren, is dan 1.65 kN/m^2 .

Overige uitgangspunten zijn zoals onderstaand beknopt weergegeven.

Factoren voor windbelasting

Voor de windbelasting worden de volgende factoren gerekend conform Eurocode 1992-1-4:

- winddruk: 0.8
- windzuiging: 0.5
- correlatiefactor: 0.85

Afmetingen gebouw

- gemiddelde breedte: 27m
- gemiddelde lengte: 17.5m

Berekeningsmethode

De berekening wordt uitgevoerd volgens de VBC methode. Deze methode is in de Eurocode nog steeds geaccepteerd en geeft een nauwkeurige benadering van de berekening van een kern. De beide U-vormen worden niet als samengestelde doorsnede beschouwd.

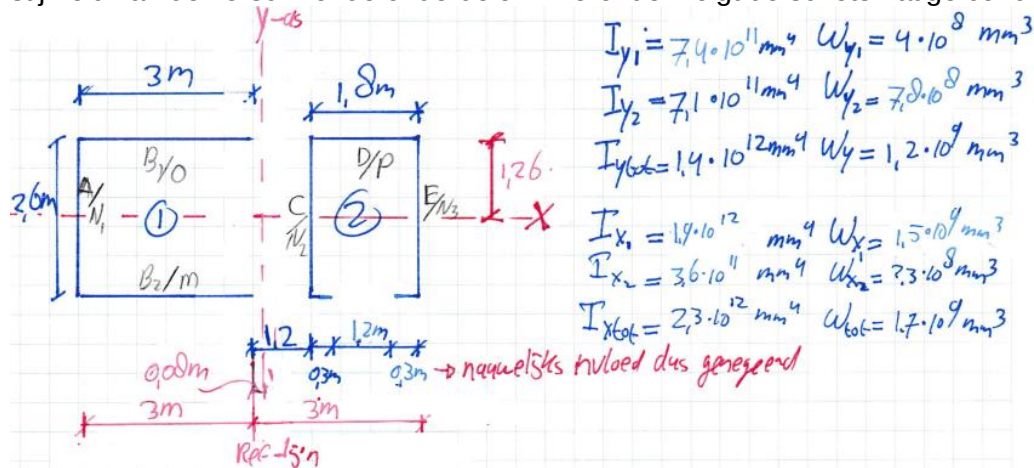
Veerstijfheid palen

Voor de palen wordt een veerstijfheid van 100000 kN/m aangehouden.

4.2.2 Berekening

Stijfheid kernen

De wanden van beide U-vormen zijn, behalve aan de boven- en onderzijde, onderling niet met elkaar verbonden waardoor deze niet als één geheel worden beschouwd. De stijfheid van de afzonderlijke onderdelen wordt daarom gesommeerd. In Bijlage G: Achtergrond gebruikte formules en spreadsheets, is de volledige spreadsheet opgenomen voor het berekenen van de stijfheid van de verschillende onderdelen. Hieronder volgt de schetsmatige conclusie in:



Figuur 39: Stijfheid kernen

Belastingen

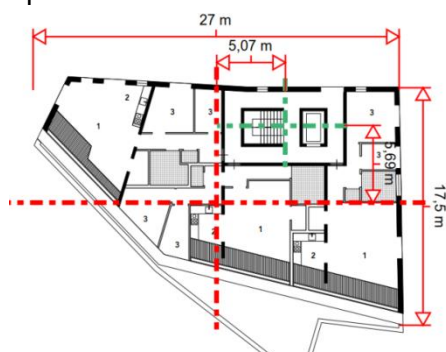
Windbelasting

De op te nemen windbelasting per strekkende meter in de bruikbaarheidsgrenstoestand is volgens de richtingen zoals weergegeven in Figuur 8:

- richting 1: $1.65 \cdot 17.5 \cdot 0.85 \cdot (0.5 + 0.8) = 31.9 \text{ kN/m}$;
- richting 2: $1.65 \cdot 27 \cdot 0.85 \cdot (0.5 + 0.8) = 49.2 \text{ kN/m}$.

Excentriciteit

In verband met de positionering van de kern ontstaat er ook een excentriciteit van kern ten opzichte van het hart van de windbelasting. In Figuur 40 is hiervan een grafische weergave gemaakt waarbij de rode lijn het hart van het gebouw betreft en de groene lijn het hart van de stabiliteits elementen. Met de maatvoering is de totale lengte en breedte van het gebouw, alsmede de excentriciteit gevisualiseerd. Gebruikmakend van de hierboven genoemde windrichtingen ontstaat er een moment per strekkende meter van:



Figuur 40: Excentriciteit windbelasting

gemaakt waarbij de rode lijn het hart van het gebouw betreft en de groene lijn het hart van de stabiliteits elementen. Met de maatvoering is de totale lengte en breedte van het gebouw, alsmede de excentriciteit gevisualiseerd. Gebruikmakend van de hierboven genoemde windrichtingen ontstaat er een moment per strekkende meter van:

- richting 1: $31.9 \cdot 5.69 = 182 \text{ kNm/m}$;
- richting 2: $49.2 \cdot 5.07 = 249 \text{ kNm/m}$.

Aanpendelende belasting

De berekening van de aanpendelende belasting is opgenomen in Bijlage G: Achtergrond gebruikte formules en spreadsheets.

Scheefstand/imperfecties

Imperfecties worden berekend conform Eurocode 1992-1-1, paragraaf 5.2 met vergelijking

$\theta_i = \theta_0 \cdot a_h \cdot a_m$. Hierin is de θ_0 de basiswaarde van $1/300$, $\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{L}} \leq \frac{2}{3}$ en

$\alpha_h = \sqrt{0.5 * \left(1 + \frac{1}{m}\right)} = \sqrt{0.5 * \left(1 + \frac{1}{7}\right)} = 0.76$. Daarin is m het aantal verticaal doorgaande elementen. Hier worden alleen de dragende lijnen en de twee kernen toe gerekend. De in rekening te brengen imperfecties zijn dus: $1/300 * 2/3 * 0.76 = 1/595$. Imperfecties hoeven alleen gerekend te worden in de UGT situatie. De berekening van de krachten met betrekking tot scheefstand is opgenomen in Bijlage G: Achtergrond gebruikte formules en spreadsheets.

Rotatieveer fundering

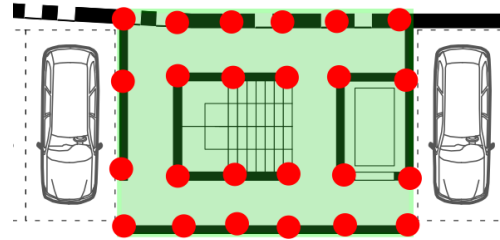
Bepalend voor de rotatieveer zijn de positie van de funderingspalen en de veerstijfheid van de palen. Met de aangenomen verticale stijfheid van $1 * 10^5 \text{ kN/m}$ van de palen, gecombineerd met een aangenomen palenplan als in Figuur 41, kan de rotatieveer berekend worden met onderstaande vergelijking:

$K_r = \sum (a^2 * k_v)$ waarin a de afstand is tot het rotatiepunt en k_v de verticale veerstijfheid van de paal is.

Met het huidige ontwerp van het palenplan, waarbij een massieve betonplaat nodig is in de fundering om de krachten te kunnen spreiden naar de omliggende palen, is de hart op hart afstand van de palen minimaal 1300mm en kunnen dus palen met een maximum voetdiameter van $1300/2.5 = 500\text{mm}$ worden toegepast. De rotatieveer is voor richting 1:

$$K_r = 1.95^2 * 10^5 * 12 + 0.65^2 * 10^5 * 12 = 5.07 * 10^6 \frac{\text{kNm}}{\text{rad}}$$

En voor richting 2: $4^2 * 10^5 * 4 + 2.6^2 * 10^5 * 4 + 1.1^2 * 10^5 * 4 + 0.5^2 * 10^5 * 4 + 0.5^2 * 10^5 * 4 + 1.8^2 * 10^5 * 4 + 1.8^2 * 10^5 * 4.2 = 19.8 * 10^6 \frac{\text{kNm}}{\text{rad}}$



Figuur 41: Aanneame palenplan

Handberekening

Met een eenvoudige handberekening wordt gecontroleerd welke van de onderdelen maatgevend zal zijn. Hierbij wordt voor de E-modulus voorlopig 10000 N/mm^2 gehanteerd en wordt uitgegaan van een volledige inklemming:

Richting 1:

$$- u = q * \frac{L^4}{8 * EI} = 31.9 * \frac{32000^4}{8 * 10000 * 1.4 * 10^{12}} = 299 \text{ mm}$$

$$- \sigma_m = \frac{M}{w} = \frac{1.5 * 31.9 * 32000^2 / 2}{1.2 * 10^9} = 20.4 \text{ N/mm}^2$$

Richting 2:

$$- u = q * \frac{L^4}{8 * EI} = 49.2 * \frac{32000^4}{8 * 10000 * 2.3 * 10^{12}} = 280 \text{ mm}$$

$$- \sigma = \frac{M}{w} = \frac{1.5 * 49.2 * 32000^2 / 2}{1.7 * 10^9} = 22.2 \text{ N/mm}^2$$

Hieruit blijkt dat de wind in richting 1 maatgevend is voor de vervorming. De totale vervorming staat gelijk aan $h : (32000/299) = h : 107$. Dat is een erg grote vervorming, zeker omdat is uitgegaan van een volledige inklemming aan de onderzijde en E-modulus van 10000. In de praktijk zal blijken dat zeker het realiseren van een roterende inklemming, die ontstaat afhankelijk van de stijfheid door het samenspel van de palen en de funderingsconstructie, grote invloed zal hebben op de vervormingen. Ook de E-modulus zal invloed hebben daar de aanwezige bovenbelasting zeer beperkt is. Deze is dan enkel te sturen door het toepassen van veel wape-nings. Daarnaast is nog niet gerekend met aanpendelende belasting en 2^e orde effecten. Volgens Eurocode 1990 bijlage A1.4.3(7) geldt een maximale horizontale vervormingseis van 1:500 voor andere gebouwen dan industrie over de gehele hoogte van het gebouw. Per bouw-

laag geldt er een eis van $h:300$. Aan deze eisen wordt niet voldaan. De verwachting is ook niet dat dit in de definitieve uitwerking wel gehaald wordt. Ook de optredende druk en trekspanning ten gevolge van het buigend moment zijn erg groot. Hierin zijn excentriciteiten en scheefstand nog niet eens meegenomen. Dit terwijl de maximale betondrukspanning al overschreden wordt.

De kern met deze afmetingen op zichzelf zal dus niet voldoen, tenzij andere onderdelen als de invloed van kruisjes, portaalwerking en de stijfheid kalkzandsteen worden meegenomen. Omdat het betonopleiding betreft, wordt een grotere kern in beton uitgewerkt. Hierbij wordt voor een eerste inschatting de buitenafmeting van 7.6×5.7 gebruikt met een vorm zoals weergegeven in Figuur 42 met 3-zijdig gesloten wanden.

De volgende stijfheden worden gehanteerd:

richting 1: $W = 1/6 \times 5.7 \times 7.6^2 - 1/6 \times 5.2 \times 7.1^2 = 11.2 \text{ m}^3$; $I = 1/12 \times 5.7 \times 7.6^3 - 1/12 \times 5.2 \times 7.1^3 = 53.4 \text{ m}^4$;

richting 2: $W = 1/6 \times 7.6 \times 5.7^2 - 1/6 \times 7.1 \times 5.2^2 = 9.2 \text{ m}^3$; $I = 1/12 \times 7.6 \times 5.7^3 - 1/12 \times 7.1 \times 5.2^3 = 34.1 \text{ m}^4$.

Handberekening

Voor een snelle inschatting wordt wederom een handberekening gemaakt, de excentriciteit veranderd niet noemenswaardig:

Richting 1:

$$- u = q \cdot \frac{L^4}{8 \cdot EI} = 31.9 \cdot \frac{32000^4}{8 \cdot 10000 \cdot 53.4 \cdot 10^{12}} = 8 \text{ mm}$$

$$- \sigma = \frac{M}{w} = \frac{1.5 \cdot 31.9 \cdot 32000^2 / 2}{11 \cdot 10^9} = 2.2 \text{ N/mm}^2$$

Richting 2:

$$- u = q \cdot \frac{L^4}{8 \cdot EI} = 49.2 \cdot \frac{32000^4}{8 \cdot 10000 \cdot 34.1 \cdot 10^{12}} = 19 \text{ mm}$$

$$- \sigma = \frac{M}{w} = \frac{1.5 \cdot 49.2 \cdot 32000^2 / 2}{9.2 \cdot 10^9} = 4.1 \text{ N/mm}^2$$

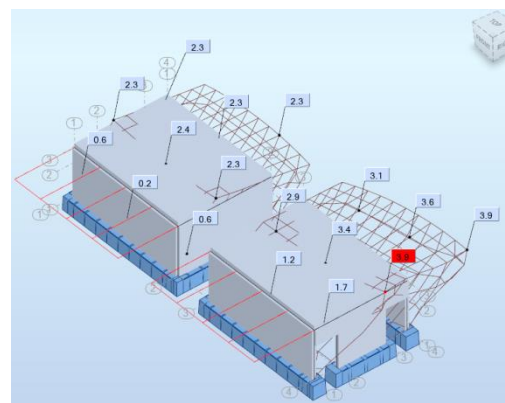
Met een maximale toegestane verplaatsing van 113mm lijkt een nauwkeurige berekening niet per se een uitdaging. Echter, doordat er sparingen in de schacht aanwezig zijn, de rotatiestijfheid nog niet is meegenomen en de fictieve E-modulus nog niet bepaald is, kan de vervorming nog flink toenemen.

Definitieve berekening richting 2

Allereerst wordt een berekening gemaakt van de op te nemen krachten (uiterste grenstoestand) waarna een berekening wordt gemaakt van de optredende vervormingen. Deze beide berekeningen kunnen afzonderlijk gemaakt worden. Verticale belasting, wringing en scheefstand uiterste worden in de grenstoestand meegenomen. De wringvervorming is zeer beperkt, waardoor dit niet in de bruikbaarheidsgrenstoestand beschouwd hoeft te worden.

Invloed sparingen

Om een inschatting te maken van de stijfheid van de kern worden nu de sparingen ook meegenomen. Hiervoor is een snelle EEM berekening gemaakt met een eenheidsbelasting. In Figuur 42 is goed te zien dat de kern minder stijf reageert en dat er ook een mate van wringing optreedt, het rotatiepunt verplaatst dus iets. De gemiddelde vervorming bij een volledig dichte kern is 2.3mm. Bij het model met sparingen is dit 3.4mm. Het model zonder sparingen reageert dus 48% stijver. Het traagheidsmoment(I) is



Figuur 42: Invloed sparingen

dus: $34.1 * 10^{12} / 1.48 = 23.0 * 10^{12} \text{ mm}^4$. Het weerstandsmoment(w) = $9.2 * 10^9 / 1.48 = 6.2 * 10^9 \text{ mm}^4$

Relatieve elasticiteitsmodulus

De relatieve E-modulus wordt bepaald aan de hand van Eurocode 1992-1-1 tabel NB-1. De stijfheid is verlopend, omdat de toegepaste wapening en belasting niet overal gelijk is. Het eerste uitgangspunt wordt een laag wapeningspercentage (2-zijdig Ø8-150) om zo te controleren of er 2^e orde verschijnselen zijn: $\alpha_n \equiv \frac{N_{ed}}{A_c * f_{cd} + (A_s * f_{yd})} = \frac{12365 * 10^3}{5100000 * 20 + 785 * 435} = 0.11$. $\rightarrow E_f = (1.96 + 432 * \rho + (20 - 196 * \rho)) * \alpha_n * 10^3 = (1.96 + 432 * 0.0027 + (20 - 196 * 0.0027)) * 0.11 * 10^3 = 5349 > 4450 \text{ N/mm}^2$, waardoor 5517 N/mm^2 de maatgevende fictieve E-modulus is.

Uitwerking

Controle of 2^e orde gerekend dient te worden.

Bepalen kniklengte > 5 bouwlagen: $L_0 = L \sqrt{1.12^2 + \frac{\pi^2}{2 * \rho}} = 32 \sqrt{1.12^2 + \frac{\pi^2}{2 * 5.1}} = 47.6 \text{ m}$

met $\rho = \text{relatieve inklemmingsstijfheid} = \frac{C * L}{E_f * I} = \frac{19.8 * 10^6 * 10^6 * 32000}{5349 * 23 * 10^{12}} = 5.1$

$$\lambda = \frac{L_0}{i} = \frac{L_0}{\sqrt{\frac{I}{A}}} = \frac{47.6 * 10^3}{\sqrt{\frac{23 * 10^{12}}{5.1 * 10^6}}} = 22.4 \quad N_{vbb} = \frac{\pi^2 * E_f * I}{L_0^2} = \frac{\pi^2 * 5349 * 23 * 10^{12}}{47.6^2} = 536406 \text{ kN}$$

$$n = \frac{N_{vbb}}{N_{ved}} = \frac{536406}{30000} = 17.9 \quad \rightarrow \frac{n}{n-1} = \frac{17.9}{17.9-1} = 1.06 \rightarrow 2^{\text{e}} \text{ orde niet van belang.}$$

Op te nemen krachten

Excentriciteit volgens Eurocode: $5700/30=190 \text{ mm}$. Totale moment ter plaatse van inklemming:

$$M_{\text{wind}} + M_{\text{excentriciteit}} + M_{\text{imperfecties}} = 1.5 * 49.2 * 32^2 / 2 + 1.9 * 12365 + 724 = 37786 + 2349 + 724 = 40859 \text{ kNm}$$

Wringing: $1.5 * 249 * 32 = 11952 \text{ kNm}$ (neemt niet toe door sparingsen, wordt iets gunstiger).

Totale dwarskracht: $1.5 * 49.2 * 32 = 2362 \text{ kN}$.

De combinatie van wringing en dwarskracht wordt bij de doorsnede controles getoetst.

Doorsnede controles

Ten gevolge van het moment ontstaat de volgende trekspanning: $M/w = 40859 * 10^6 / (6.2 * 10^9) = 6.6 \text{ N/mm}^2$. Door het eigen gewicht van de wand en een klein stukje vloer wordt dit gereduceerd met: $(0.25 * 24 * 0.9 * 32 + 7 * 8 * 0.7 * 0.9) / 250 = 0.83 \text{ N/mm}^2$. De maximale trekkracht is dan: $5.75 * 250 * 1000 / 1000 = 1438 \text{ kN/m}$. De minimale wapening is dan $1438 / (0.435 * 2) = 1652 \text{ mm}^2$ per zijde $\rightarrow$ toepassen Ø16-100 ($2011 \text{ mm}^2/\text{m}$) in de onderste laag. Daarboven kan de wapening elke verdieping verminderd worden.

De dwarskracht kan door de stijve betonvloer gespreid over het hele oppervlak en levert een schuifspanning van $2362 * 1000 / (5.1 * 10^6) = 0.46 \text{ N/mm}^2$

Naast de dwarskracht zorgt het wringend moment ook voor een dwarskracht.

De wringstijfheid van de kern, wanneer deze enkel als u-vorm wordt beschouwd is: $I_w =$

$$\frac{1}{3} * b * h^3 = \frac{1}{3} * (5575 * 2 + 7350) * 250^3 = 96 * 10^9 \text{ mm}^4$$

$$\tau = 11952 * \frac{10^6}{96 * 10^9} = \frac{0.12 \text{ N}}{\text{mm}^2}$$

De weerstand van beton tegen dwarskracht is:

$$V_{Rd,c} = C_{Rd,c} * k * (100 * \rho_l * f_{ck})^{\frac{1}{3}} = 0.12 * \left(1 + \sqrt{\frac{200}{5700}}\right) * \left(100 * \frac{2011 * 2}{250 * 1000} * 30\right)^{\frac{1}{3}} = 0.12 * 1.19 * 3.64 = \frac{0.52 \text{ N}}{\text{mm}^2}$$

De dwarskrachtcapaciteit van het beton wordt dus overschreden, waardoor deze volledig met wapening dient te worden opgenomen. Omdat de betonkern geen standaard doorsnede met beugels betreft, wordt de dwarskrachtwapening bepaald met vergelijking 6.25 uit Eurocode 1992-1-1. Hierin wordt enkel het aandeel wapening bepaald uitgaande van een geprofileerd aansluitvlak en een wapeningshoek van 90 graden.

$$A_{ben} = \frac{V_{Ed}}{\mu * f_{yd}} = \frac{0.58 * 250 * 1000}{0.9 * 435} = 370 \text{ mm}^2/\text{m}.$$

In het ontwerp van de wapening op basis van buiging zit een reserve van $2011 - 1652 = 359 \text{ mm}^2$ waardoor er per meter 11 mm^2 wapening te kort zou zijn. Omdat niet de gehele doorsnede tegelijk op trek belast wordt, kan uitgegaan worden van een plastische verdeling van de dwarskracht waardoor de reeds bepaalde wapening, $\varnothing 16-100$, als afdoende wordt beschouwd.

Vervormingen

Omdat er geen 2^e orde berekening gemaakt hoeft te worden, kunnen de vervormingen eenvoudig gecontroleerd worden. Nog steeds uitgaande van de lage E-modulus zijn de vervormingen tweeledig. Eén deel is de vervorming van de kern, een ander deel is de vervorming van de fundering. Dit leidt tot de volgende vergelijking:

$$\Delta_{top} = \frac{q * L^4}{8 * E_f * I} + \frac{\frac{1}{2} * q * L^3}{C} = \frac{49.2 * 32000^4}{8 * 5349 * 23 * 10^{12}} + \frac{\frac{1}{2} * 49.2 * 32000^3}{19.8 * 10^6 * 10^6} = 52 + 41 = 93 \text{ mm}$$

De maximale vervorming is dus kleiner dan maximaal toelaatbaar. Het blijkt dat, door het meer nauwkeurig berekenen van de elasticiteitsmodulus en het meenemen van de rotatiestijfheid van de fundering, de resultaten flink veranderen. Doordat de vervormingen erg binnen de perken blijven, heeft het geen zin deze verder te optimaliseren, omdat in de onderste lagen meer wapening benodigd zal zijn.

De kern voldoet dus op sterkte, stijfheid en stabiliteit.

5 Conclusie

Uit het vooronderzoek bleek dat er vroeger en tegenwoordig nog nauwelijks rekening werd gehouden met de maatschappelijk invloed van constructieve ontwerpen op onze maatschappij. Uit het vervolgonderzoek bleek dat dit zeker niet terecht is zoals in onderstaand paragrafen te lezen is.

Door de verschillende functies en, mede daardoor, constructieve-overgangen, zijn de conclusies uit dit onderzoek ook verschillend. Wat alle constructies gemeen hebben is dat ze allemaal impact hebben op ons milieu en dus onze maatschappij.

Een gemiddelde vierkante meter vloer in een appartement, restaurant of garage heeft een CO₂ emissie van 94kg. De invloed van 94kg op onze maatschappij staat gelijk aan:

- de CO₂ emissie van een auto wanneer er 627 kilometer wordt gereden;
- de CO₂ emissie van een vliegtuig wanneer er 207 kilometer wordt gevlogen;
- de CO₂ emissie bij de productie van 376 plastic tassen;
- de CO₂ emissie bij de productie van 188 plastic flessen.

Met een totaal vloeroppervlak voor het gehele project van ongeveer 450m² en een verschil emissie van 20% tussen een kanaalplaat en breedplaatvloer kan enkel de keuze van een vloersysteem leiden tot grote invloed. De maximale besparing op emissie staat gelijk aan een auto die 4,5 keer de wereld rondrijdt of de productie van 133.668 plastic tassen.

Ook bij de keuze van het wandsysteem is de invloed groot. De emissie van een gemetselde kalkzandsteen wand ten opzichte van een prefabbetonwand is een factor 2.3 lager. Met een totale oppervlakte van ongeveer 325m² geldt ook hier dat de maatschappelijke invloed aanzienlijk is. Wanneer er voor kalkzandsteen wordt gekozen, in plaats van een prefabbetonwand, wordt een besparing gemaakt die gelijk staat aan de CO₂ emissie van een vliegtuig dat de wereld rondvliegt of de productie van 40.300 plastic flessen.

Bij kolom-ligger constructies zijn in de variantenstudies ook staalconstructies en staal-betonconstructies meegenomen. Doordat staal voor een groot deel uit gerecycled materiaal bestaat, ligt de emissie bij staal relatief laag. Het blijkt dat, bij een optimale samenwerking van staal en beton, een staal-beton structuur erg geschikt is. De kosten zijn laag en het materiaalgebruik is minimaal, daardoor is de maatschappelijke invloed ook minder. Doordat kolom-ligger constructies uit veel minder materiaal bestaan dan vloeren en wanden, is de relatieve besparing op de CO₂ emissie op het gehele project beperkter, maar niet onbelangrijk.

Wanneer men puur kijkt naar kolom-ligger constructies en deze vergelijkt, kan de invloed van ontwerpkeuzes wel groot zijn. De verschillen tussen een staal-beton constructie ten opzichte van een prefabbetonconstructie zijn ongeveer een factor 2.

Al met al kan vooral geconcludeerd worden dat met name prefabbetonconstructies de grootste invloed hebben op onze maatschappij. Daarnaast zijn de materiaalkosten ook hoog, waardoor het in die zin een minder goede keuze lijkt. Doordat in dit onderzoek geen vergelijking is gemaakt in kosten met betrekking tot bouwtijd, geeft dit een vertekend beeld. Het is goed mogelijk dat het voor veel aannemers toch goedkoper is om een prefabconstructie toe te passen.

Puur kijkend naar materiaalkosten en emissies hoeft een maatschappelijk verantwoorde constructie niet duur te zijn. Een kalkzandsteenwandenstructuur met kanaalplaten is goedkoop en heeft een minimale CO₂ emissie.

6 Reflectie

Persoonlijke ontwikkeling

Gedurende dit afstudeeronderzoek heb ik mij enorm ontwikkeld op het gebied van constructief ontwerpen. Ik heb veel inzicht gekregen in verschillende ontwerpaspecten, duurzaamheid en bouwkosten. Door veel overleg met verschillende partijen is ook veel inzicht ontstaan in de overwegingen bij het samenstellen van betonmengsels en afwegingen voor de uitvoering.

Het was een erg interessant traject waar ik veel algemene dingen heb geleerd over constructies, meer praktisch ben gaan denken over uit te voeren constructie-elementen en ook gemerkt heb dat de basis die ik in de eerste jaren van de betonvereniging heb gelegd, ontzettend bruikbaar is op allerlei verschillende fasen van een project. Natuurlijk kom je dit dagelijks in de praktijk ook in deeltjes tegen, maar als je een project van begin tot eind uitwerkt, merk je dat er veel meer bij komt kijken.

De grootste uitdaging voor een (constructief) ontwerper zit in het samenbrengen van alle randvoorwaarden en wensen van een opdrachtgever. Deze, en andere aspecten moeten in overleg met alle ontwerppartijen leiden tot een zo optimaal mogelijk ontwerp. Kosten is hierin altijd al een belangrijke knop geweest om aan te draaien. Tegenwoordig zie je dat de maatschappij verandert. Ik denk dat dit onderzoek voor mij, mijn collega's en misschien ook wel derden een eerste aanzet kan zijn om daar rekening mee te gaan houden.

Waar ik mij als constructief ontwerper in eerste instantie nog wat stuurloos voelde, zie ik deze fase van mijn carrière nu met veel meer vertrouwen tegemoet. Ik ben altijd van mening geweest dat een goede constructeur iemand is die veel meer kan dan alleen sommetjes maken, maar hoe je de stap maakt van constructeur naar ontwerper kon maken, bleef voor mij altijd een beetje vaag. Ik ben er achter gekomen dat het vooral een ervarings-vak is en dat men vooral leert door te doen. Door het vooronderzoek en gesprekken met collega's heb ik hierin veel vertrouwen weten op te bouwen en merk ik dagelijks dat ik de vergaarde kwaliteiten nu al toepas in de praktijk.

Proces

Kijkend naar het hele proces vind ik dat het over het algemeen erg gestructureerd is verlopen. Na een moeilijke opstartfase kreeg ik de smaak te pakken waarna de ene naar de andere stap gezet kon worden. Door vooraf alle randvoorwaarden te creëren voor een gedegen verslaglegging, een planning op te zetten en de opzet van het verslag in grote lijnen klaar te hebben liggen, liep het proces gestroomlijnd en soepel.

Door een trage opstartfase kwam de planning wel wat meer in het gedrang waardoor af en toe van de structuur werd afgeweken. Voordat de variantenstudie werd opgezet, was nog niet de gehele voorstudie afgerond en zijn enkele aannames gemaakt die achteraf niet volledig juist blijken te zijn. Zie voor een toelichting hierop ook hoofdstuk 7.

Ondanks bovenstaande denk ik dat ik toch met veel tevredenheid terug mag kijken op een proces waarin ik heb leren onderzoeken, ontwerpen en theoretische kennis van verschillende onderdelen heb weten te bundelen tot een krachtig onderzoeksrapport.

7 Discussie en aanbevelingen

1. Staalkwaliteiten: tijdens de voorstudie van dit onderzoek is met name op het aspect duurzaamheid veel informatie verzameld uit verschillende bronnen. Een deel van de bronnen bestaat uit artikelen en publicaties uit vakbladen, maar een deel is ook gebaseerd op gesprekken met collega's en mensen uit de praktijk. In deze gesprekken en artikelen kwam naar voren dat er op het gebied van staalconstructies veel winst te behalen is op het aspect duurzaamheid en kosten door een hogere staalkwaliteit toe te passen. Hiervoor zijn vanuit verschillende bronnen, verschillende argumenten naar voren gekomen die op dat moment plausibel leken, maar nog niet bevestigd waren. De verwachting was dat gaandeweg het afstudeeronderzoek naar voren zou komen dat de achterliggende bron gevonden zou worden. Voor niet alle onderdelen was dit het geval, waardoor het uitgangspunt om voor alle staalconstructies standaard S460 staal toe te passen een arbitrair uitgangspunt is. Het is zeer aan te bevelen om in de ontwerp- of uitvoeringsfase van een project de kosten en emissie van verschillende staalkwaliteiten te onderzoeken.
2. Bouwkosten: de bouwkosten zijn gebaseerd op kengetallen van 2 verschillende websites. Dit geeft slechts een globale inschatting van de kostprijs. Hierin zijn allerlei aspecten als bouwtijd, transportkosten, kraaninzet, verbindingsmaterialen, knipverliezen en beschikbaarheid van materialen niet meegenomen. Daarnaast zitten er verschillen tussen de websites en zijn beschikbare prijzen geïnterpoleerd tot de benodigde waarden. Aannemers hebben vaak ook een voorkeur in bouwsystematiek, waardoor er ook tussen aannemers grote prijsverschillen zitten voor gelijke uitvoeringsmethodieken. Het is sterk aan te bevelen om, indien mogelijk, bij integraal ontwerpen ook in een zo vroeg mogelijke fase een aannemer aan de tafel te hebben om het project maximaal te kunnen optimaliseren op het gebied van kosten en duurzaamheid.
3. Kostprijs holle wand: deze ligt erg laag en is gebaseerd op één enkele beschikbare waarde. Vergelijkend met prefab en in het werk gestorte wanden is het de vraag of dit klopt.
4. Massieve betonvloer bij overgangsconstructie B: hierin is in de kosten en emissie geen rekening gehouden met eventuele kosten en emissie uit krimpwapening, monitoring en beheersing van betontemperatuur ten gevolge van het uitharden en andere uitvoeringsaspecten. Dit kan een sterk vertekend beeld geven voor de gepresenteerde kostprijs en CO₂ emissie.
5. Boogvorm: Achteraf was het beter geweest om de boogvorm te optimaliseren door deze te integreren met de balk op de verdieping. Er is dan minder verdiepingshoogte nodig waardoor kosten en CO₂ emissie lager zijn. Mocht de grote verdiepingshoogte gewenst zijn, kan de boog alsnog worden geïntegreerd waardoor de vrije doorgang breder wordt en de boogwerking verbeterd. Dit zou kunnen zorgen voor een nog slankere boog en een reductie van de wapening.

8 Termen en afkortingen

i.h.w.g.= in het werk gestort (beton)

VBC = Nederlands betonnorm voordat de Eurocode uit kwam

Ved = Maximaal optredende dwarskracht

Ned = Maximaal optredende normaalkracht

Med = Maximaal optredend moment

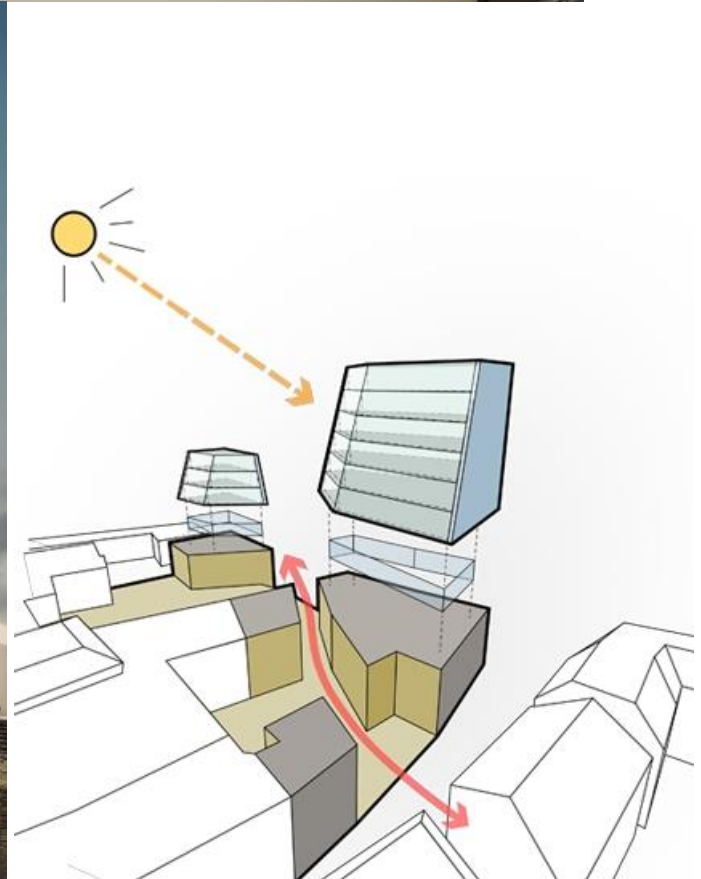
EEM = Eindige elementen berekening

9 Bibliografie

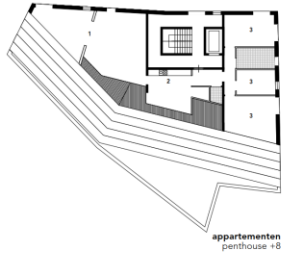
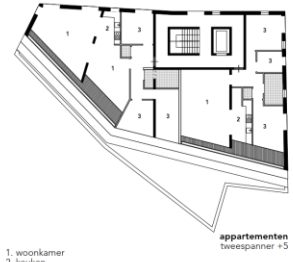
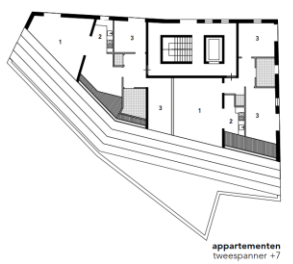
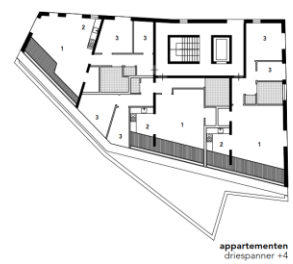
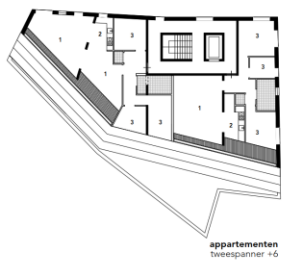
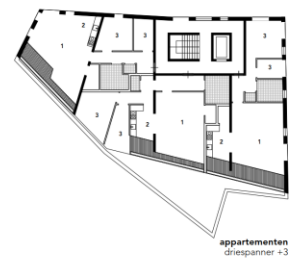
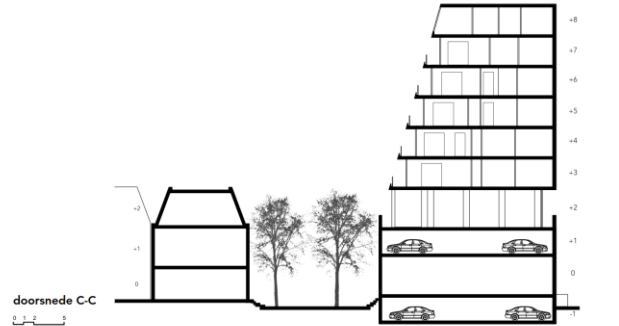
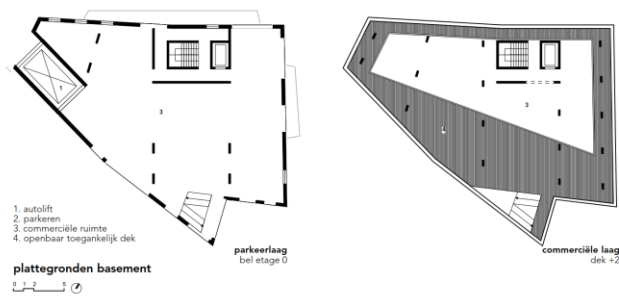
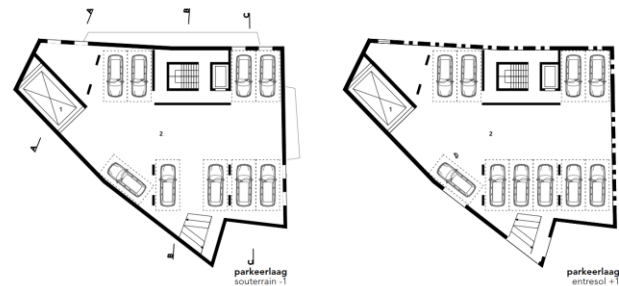
Alle gebruikte websites zijn opgeslagen en op verzoek verkrijgbaar.

- [1] „SBRCUR,” [Online]. Available: <http://www.sbrcur.net.nl/producten/kennisarchief/bouwbesluit-geluidsisolatie-en-woningbouwpraktijk/1-akoestische-details-voor-de-woningbouw>. [Geopend December 2017].
- [2] „Bouwkosten.nl,” [Online]. Available: <https://bouwkosten.bouwformatie.nl/>. [Geopend November 2017].
- [3] „Faay.nl,” [Online]. Available: <https://www.faay.nl/iw200-70/>. [Geopend November 2017].
- [4] i. A. v. d. Marel, Ontwerpen en dimensioneren van betonconstructies, Utrecht: Betonvereniging, juni 2012.
- [5] H. Welleman, Notities over kabels en bogen, Utrecht: Welleman, 2013.
- [6] B. v. F. v. Betonproducten, PBTO: Bouwen in prefab beton, BFBN.
- [7] d. u. architecten, „<http://deuniearchitecten.nl>,” 2016. [Online]. Available: http://deuniearchitecten.nl/assets/documents/klop_39e.pdf. [Geopend april 2017].
- [8] oktober 2015. [Online]. Available: <http://zador.nl/nieuws/de-voor-en-nadelen-van-een-staalconstructie-ten-opzichte-van-een-betonconstructie/>. [Geopend juli 2017].
- [9] Movares, „Utiliteitsbouw: beton of staal?,” *Cement*, p. 8, 2013.
- [10] januari 2018. [Online]. Available: <http://www.vobn-beton.nl/csc/duurzaam-bouwen-met-beton/beton-en-co2-emissie>. [Geopend januari 2018].
- [11] januari 2018. [Online]. Available: http://www.xella.nl/productie_2675.php. [Geopend januari 2018].
- [12] J. d. Vree, „www.joostdevree.nl,” [Online]. [Geopend juni 2017].
- [13] december 2000. [Online]. Available: http://wiki.bk.tudelft.nl/mw_bk-wiki/images/5/58/Vloersystemen.pdf. [Geopend juni 2017].

Bijlage A: Impressie architect



Bijlage B: Plattegronden en doorsnede architect



Bijlage C: Literatuurstudie

Bouwsystemen

Beton

Beton wordt al eeuwen toegepast in verschillende constructies. Waar het ooit begon met ongewapend beton wordt beton tegenwoordig nagenoeg altijd gewapend. Het wapenen van constructies is bewerkelijk en dus duur.

Beton wordt in verschillende varianten uitgevoerd te weten:

- in het werk gestort;
- prefab;
- combinatie van prefab en in het werk gestort beton.

De afwegingen om voor één van bovenstaande methoden te kiezen worden vaak gebaseerd op:

- snelheid waarmee het project gerealiseerd moet worden;
- beoogde kwaliteit;
- benodigde overspanning;
- het al dan niet in zicht zijn van beton;
- constructieve haalbaarheid.

De CO₂ uitstoot van beton is ongeveer 280kg CO₂ per geproduceerde kubieke meter gewapend beton*.

In het werk gestort beton

Dit is de meest traditionele vorm van de toepassing van beton welke dagelijks nog gebruikt wordt. Een andere naam welke veel gebruikt wordt is "in-situ beton". Ondanks dat deze variant veel gebruikt wordt is dit een kostbare en met name een tijdrovende methode. Er is vrijwel altijd een bekisting nodig en de wapening moet in het werk gevlochten worden. Naast de voorbereidingstijd is er ook nog de tijd welke benodigd is om uit te harden. Op dat moment is de gestorte constructie niet bruikbaar dus dat kost geld.

Het grote voordeel van een in het werk gestorte betonconstructie is de samenhang. Knopen zijn monoliet gestort waardoor het eenvoudiger is een stabiele constructie te realiseren.



Figuur 1: Beton storten op de bouwplaats

Tunnelbouw



Figuur 2: Tunnelbouw

dient de wapening op de bouwplaats te worden aangebracht.

Een variant op de traditionele in het werk gestorte beton is tunnelbouw. Bij tunnelbouw wordt er zoals de naam al aangeeft gewerkt met tunnels. Op Figuur 2 is een voorbeeld te zien van een tunnel. Deze elementen hoeven enkel aan de buitenzijde van de wand bekist te worden en kunnen worden gestapeld op de onderliggende constructie. Doordat de temperatuur en het beton vaak beheerst wordt kan er sneller ontkist worden dan in een traditionele constructie wat zorgt voor een extra vlotte voortgang. Wel

* <http://www.vobn-beton.nl/csc/duurzaam-bouwen-met-beton/beton-en-co2-emissie>

Prefab

Het prefabriceren van beton is een toepassing van beton welke steeds vaker gebruikt wordt. Het bouwen met prefab elementen is een bouwwijze waarbij integraal naar de bouwopgave wordt gekeken. Snel bouwen, beheerste kwaliteit en lage faalkosten zijn de grootste voordelen van het toepassen van prefab elementen. Prefab kan zoals in de hieropvolgende studies naar wanden en vloeren beschreven wordt, op vele verschillende manieren worden toegepast. De constructieve betontoepassing in de gebouwen richt zich met name op, vloeren en wanden, in mindere mate worden ook



Figuur 3: Prefab fabriek

kolommen en balken toegepast. Essentieel om een prefabproces goed te laten functioneren is een goede planning. Het grootste nadeel van prefab bouwen is dat aanpassingen welke niet standaard zijn, relatief veel geld en tijd kosten.

Knopen

De knopen in prefabbeton kunnen op 2 manieren worden uitgevoerd:

- Droge knoop: volledig prefab en zonder in het werk gestort beton.
- Natte knoop: bij een natte knoop zijn de elementen volledig prefab maar wordt er gebruik gemaakt van in het werk gestort beton voor de knopen. Deze methode bevordert de samenhang van een constructie.



Figuur 4: Voorbeeld natte knoop



Figuur 5: Holle wand

Semi-prefab

Tot slot, in de categorie beton, is er nog semi prefab. Dat is een combinatie tussen prefabbeton en in het werk gestort beton. Hierbij wordt het prefab element zo ontworpen dat zo min mogelijk bekisting nodig is op de bouwplaats zonder dat de beheerste kwaliteit verloren gaat. Denk hierbij bijvoorbeeld aan een breedplaat of een holle wand. Het voordeel van semi prefab t.o.v. prefab is dat er vaak een minder zware kraan benodigd is en dat er meer samenhang tussen de verschillende constructie onderdelen bestaat.

Staal

Staal wordt al jaren over de hele wereld toegepast in verschillende bouwwerken. Het kan worden toegepast in allerlei projecten variërend van kleinschalige woningbouw tot bruggen met enorme overspanningen. Staal is een steeds duurzamer materiaal en puur naar de productie kijkend, een relatief duurzaam materiaal.

Staal is een materiaal dat staat voor een snelle en exacte uitvoering. De maatvoering van een staalconstructie is erg nauwkeurig en doordat er geen natte knopen aanwezig zijn is de opbouw van de constructie snel. Een groot deel van de constructie wordt in de fabriek voorbereid waardoor montage op de bouw normaliter eenvoudig is.

De kosten van een constructie waarin staal de overhand heeft liggen doorgaans hoger dan bij een betonconstructie. Daar waar staal snel te monteren is dient het in de afwerking vaak nog bewerkt te worden. Het materiaal heeft van zichzelf een lage brandwerendheid, een slechte geluiddemping en kan slecht warmte opnemen waardoor het isolerend vermogen relatief laag ligt. Bovengenoemde redenen maakt staal meer geschikt voor utiliteitsbouw dan woningbouw.

Bij eens staalconstructie wordt vaak gekozen voor eens staalskelet met betonvloeren. Staal heeft een hoge soortelijke massa waardoor een massieve staalconstructie zeer zwaar en onhandzaam zou worden. Daarnaast zijn de negatieve capaciteiten van staal, m.b.t. isolerend vermogen en brandwerendheid, geen sterke randvoorwaarden om een vloer te realiseren.

Zoals hierboven benoemd is de snellere bouwtijd het grote voordeel van staal. Daarnaast heeft staal het grote voordeel dat he eenvoudig aan te passen is, dit biedt dus meer flexibiliteit. Tot slot is in een tijd waarin duurzaamheid voorop staat staal een goed alternatief om mee te bouwen. Staal is 100% recyclebaar en daarmee een van de meeste duurzame bouwmaterialen. Op dit moment wordt 80% van het balkstaal geproduceerd uit schrootstaal(gebruikt staal*).

Naast dat het materiaal recyclebaar is, is staal ook goed te demonteren. Staalconstructie kunnen hierdoor “gemakkelijk” hergebruikt worden op een andere plek of voor een deel gedemonteerd worden. Balkstaal wordt op dit moment voor zo'n 50% als bouwdeel gebruikt in een nieuw gebouw**. De CO₂ emissie van de productie van staal is ongeveer 480kg/ton***.

Een staalconstructie kan meestal slanker geconstrueerd worden dan een betonligger. Bij een staalconstructie waarbij grote overspanningen dienen te worden gemaakt kunnen raatliggers en vakwerkliggers uitkomst bieden. Dit heeft tot voordeel dat er gewichtsreductie plaatsvindt maar ook dat leidingen makkelijk doorgevoerd kunnen worden.

* <http://www.duurzaaminstaal.nl/>

** <http://www.duurzaaminstaal.nl/>

*** <http://www.bouwenmetstaal.nl/themas/duurzaam/staal-co2>

Staalkwaliteiten

Over de toepassing van de gekozen materiaalkwaliteit is de laatste jaren veel te doen. Daar waar veel constructeurs welke lang in het vak zitten vast houden aan de basiskwaliteit van S235 voor balkstaal, zijn er ook veel constructeurs innovatief en willen deze groep volledig uit het straatbeeld verwijderen. Argumenten voor een hoge staalkwaliteit zijn*:

- hogere sterkte dus slanker construeren;
- minder massa dus goedkoper construeren;
- slankere profielen dus verbindingen minder zwaar en complex; las volumes kleiner;
- stabiliteit hoger, knik- en kipkromme is beter;
- dynamisch gedrag soms gunstiger doordat er dunnere platen kunnen worden toegepast;

Lichtere constructies betekenen eventueel ook:

- minder kraaninzet;
- minder transport dus minder kosten en dus minder CO₂ emissie;
- minder hulpconstructies.

Voor puur buigende elementen is de doorbuiging van een ligger nog wel eens maatgevend. Voor die specifieke situatie heeft het weinig zin om de staalkwaliteit te verhogen. Echter als men naar een gebouw kijkt kan een staalconstructie bestaan uit de volgende onderdelen:

- kolommen (Drukstaven);
- liggers (Buiging);
- vakwerken (Druk- en trekstaven).

Voor het grootste deel van de constructieonderdelen is het dus wel degelijk van belang dat men een hoge materiaalkwaliteit toepast om de bovenstaande voordelen volledig uit te nutten.

Zelfs voor constructies waarin stijfheid maatgevend is zijn er nog argumenten aan te voeren om deze toch uit te voeren in de hogere staalkwaliteit S460. De detaillering bij de oplegging wordt eenvoudiger en er is ook minder laswerk benodigd. Tevens kan door de hogere stabiliteit vaker een slanker, hoger, profiel(IPE) worden toegepast met dezelfde sterkte eigenschappen. Tot slot zijn er ook voordelen voor het doorvoeren van sparringen omdat er restcapaciteit in het profiel aanwezig is omdat de stijfheid maatgevend was.

Er zijn niet louter voordelen voor het toepassen van een hogere staalkwaliteit. De volgende aandachtspunten dienen in acht te zijn genomen:

- er is een gecertificeerde lasser vereist;
- plooigedrag van dunne platen is een risico;
- momentvaste verbindingen moeten extra aandacht worden gegeven omdat er minder materiaal aanwezig is;
- de herkomst van het staal moet traceerbaar zijn waardoor de materialen 1% duurder worden. In het kader van duurzaamheid is dit juist een gunstig aspect.

*http://www.duurzaamstaal.nl/upload/File/BMS_235_S235.pdf

Combinatie van staal en beton

Naast de traditionele keuze tussen staal en beton bestaan er ook gecombineerde systemen. Het combineren kan gezien worden in brede zin. In dit hoofdstuk wordt niet gekeken naar een structuur waarin bijvoorbeeld stalen liggers worden gecombineerd met betonkolommen. Dit gaat echt over een staal-beton structuur waarbij een buigstijf stalen element schuifvast verbonden is aan een betonelement. Hierbij kan men denken aan:

- staalbeton kolommen;
- staalbeton liggers;
- staalplaatbeton vloeren.

Bij gewapende beton structuren wordt gebruik gemaakt van de voordelen van staal; grote trek-capaciteit en een hoge elasticiteitsmodulus. Dit in samenwerking met de hoge drukcapaciteit en stijfheid van beton. Bij een samengesteld profiel worden de voordelen van de materiaaleigenschappen nog verder uitgenut.

Het beton is brandwerend, beschermd tegen corrosie, voorkomt effecten als kip, plooi en knik.

Staal daarentegen zorgt voor een hoge ductiliteit en daarom dus voor een grote plasticiteit waardoor het beton beschermd is tegen bezwijken zonder waarschuwen.

Staal-beton kolommen

Een staal-beton kolom wordt doorgaans vooral toegepast indien er een hoge



brandwerendheid benodigd is bij een staalconstructie.

Afhankelijk van de uitvoering (beton aan de binnenzijde of buitenzijde), is elke brandwerendheidseis haalbaar. Door de hoge brandwerendheid van beton, kan het staalprofiel veel kleiner worden gekozen dan bij een traditionele staalkolom.

Figuur 6: Voorbeelden van uitvoeringsmethoden

Ten opzichte van een betonkolom is een staal-betonkolom ductieler en sterker. Er is hierdoor minder beton, en ook minder wapening benodigd dan bij een standaard gewapende betonkolom.

Voor de uitvoering biedt een staalbetonkolom geen voordelen ten opzichte van een traditionele staalconstructie. Het grote voordeel van staalbouw is dat het een hoge bouwsnelheid heeft, deze gaat verloren. Hoewel het mogelijk is staal-beton kolommen in zijn geheel geprefabriceerd op de bouwplaats te krijgen zijn er ook veel nadelen. Er is een veel zwaardere kraan benodigd en er zijn extra handelingen nodig zoals; bekisting, wapening, storten, en het uitharden van beton. Daarnaast kunnen verbindingen complexer worden doordat krachtsinleiding bij staal-beton kolommen zeer belangrijk is.

Aandachtspunt voor de in het werk met beton gevulde buis/koker kolom is de het opwarmen van het beton. Voor het storten moeten er in de buiswand minimaal 2 gaten geboord worden, 1 aan de voet en 1 aan de top. Dit is om de ontwikkelde warmte, en dus waterdamp uit de kolom te laten.

In het kader van duurzaamheid kan eventueel wel winst geboekt worden door de toepassing van minder materiaal. Gewichtsbesparing is bij kolommen niet relevant omdat het nauwelijks invloed heeft op het totale gewicht van de draagstructuur.

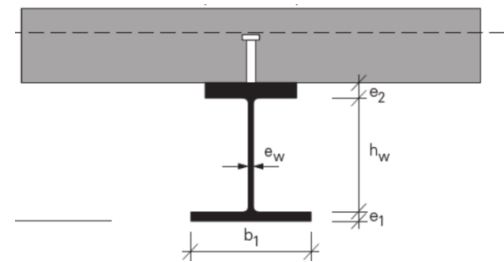
Tot slot kan het voor een architect ook aantrekkelijk zijn om een staal-beton structuur toe te passen omdat slankere kolommen gerealiseerd kunnen worden waardoor er meer ontwerpvrijheid is.

Staalplaatbeton vloeren

Voor een toelichting op staalplaatbetonvloeren wordt verwezen naar het literatuuronderzoek m.b.t. vloeren.

Staal-beton liggers

Bij staal-betonliggers wordt getracht optimaal gebruik te maken van de materialen staal en beton. Het beton dient als drukzone en de stalen ligger zorgt voor de trekkracht. De dwarskracht wordt grotendeels opgenomen door het staalprofiel. Voor een ideale samenhang tussen staal en beton is er een koppeling tussen de verschillende materialen nodig door middel van deuvels zoals te zien is op: Figuur 7.



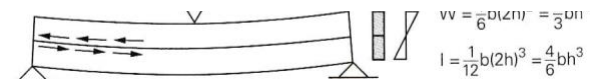
Figuur 7: Staal-beton ligger

Door de samenwerking van staal en beton kan in veel gevallen fors bespaard worden op de benodigde kilo's voor de staalconstructie. Het kan gecombineerd worden met bijna elk type betonvloer, van kanaalplaat tot in het werk gestort beton. De benodigde maatregelen om het beton volledig samen te laten werken met de constructie verschillen echter. Een staalplaatbetonvloer of een in het werk gestorte betonvloer is hiervoor het meeste geschikt. Het nadeel van dit type ligger is dat het beton enkel voordeel biedt bij een positief buigend moment. Hierdoor dient voor een negatief buigend moment wapening te worden toegepast. Vaak biedt een plastische berekening een ideale uitkomst om de maximale capaciteit uit de verschillende materialen te halen.

Naast dat de materiaaleigenschappen optimaal worden gebruikt, nemen ook de statische eigenschappen, traagheidsmoment en weerstandsmoment toe. Afhankelijk van de koppeling tussen het staal en het beton zal dit volledig of deels samenwerkend zijn zoals in Figuur 8 zichtbaar is. Het volledig schuifvast maken van een staal-betonligger kost ongeveer 2 euro per vierkante meter vloeroppervlak.



Figuur 8: Geen schuifvaste verbinding



Figuur 8: Volledig schuifvast verbonden

Geconcludeerd kan worden dat staal-betonliggers vaak een materiaal besparende functie hebben waardoor de invloed op het milieu beperkt blijft en het beschouwd kan worden als een duurzame oplossing. Een nadeel is de hogere bewerkelijkheid van de staalbetonliggers. Om de liggers schuifvast te maken zijn deuvels benodigd. Dit kan eventueel in de fabriek voorbereid worden maar er zijn ook mogelijkheden om dit op de bouw uit te voeren. De vraag is of de extra bewerkingen opwegen tegen de besparing van materialen.

Vloersystemen

Vlakke plaatvloer



Dit is de meest klassieke betonvloer. Een vloer gestort op een bekisting met wapening in 2 richtingen. Alles wordt in het werk aangebracht wat er voor zorgt dat het een tijdrovend proces is in vergelijking met de opties tot prefabriceren. Een basis vlakke plaatvloer heeft een maximale overspanning tot 8m, met voorspanning kan dit worden opgehoogd tot 10m. De vloer is uit te voeren in een puntvormig- of lijnvormig ondersteunde variant.

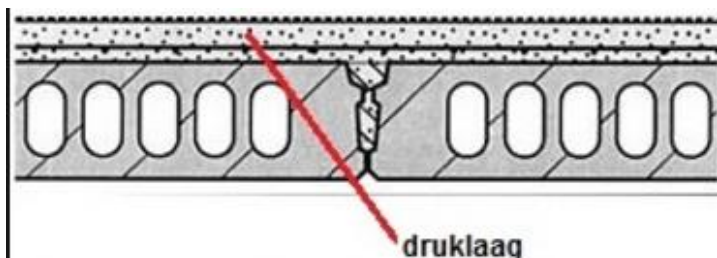
Voordelen:

- flexibel en vormen en wapening;
- massief dus geluiddicht;
- veel mogelijkheden tot sparingen.

Nadelen:

- productie neemt veel tijd in beslag op de bouwplaats;
- duurder dan prefab.

Kanaalplaatvloer



De kanaalplaatvloer is een voorgespannen plaat met kanalen(doorgaande sparingen in de lengte van de plaat). De kanaalplaat kan worden voorzien van isolatie aan de onderzijde waardoor deze geschikt word als begane grondvloer. De kanaalplaatvloer kent verschillende varianten waardoor deze op verschillende bouwconstructies toe te passen is. Het is mogelijk om volgens vaste voorschriften sparingen op te nemen zodat de sparingen reeds in de fabriek gemaakt kunnen worden. Tot slot kunnen de kanaalplaatvloeren worden afgewerkt met een druklaag waardoor de capaciteit en dus mogelijke, toelaatbare, overspanningen en/of belasting toenemen.

De dikte van een kanaalplaatvloer is vaak bij benadering $1/38 \cdot \text{overspanning}$. De toe te passen overspanning varieert tussen de 6 en 18m. De nadelen van de kanaalplaatvloer zijn de beperkte mogelijkheid tot uitkragingen en het invoeren van leidingen in de vloer.

Varianten op de kanaalplaatvloer

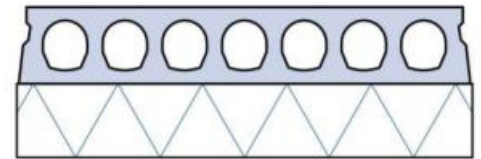
Vleugelvloer



De vleugelvloer is een vloer welke aan de zijkant is verbreed met 2 breedplaten. Op het breedplaat gedeelte kunnen leidingen worden ingestort. Dit is een vrij nieuw vloertype welke in Nederland nog niet vaak is toegepast. Dit komt mede doordat de oplossing vrij duur is.

Isolatieplaatvloer

Een vloer waarbij isolatie aan de onderkant of bovenkant van de plaat is opgenomen. Op deze manier is de vloer ook geschikt als beganegrond- of dakvloer.



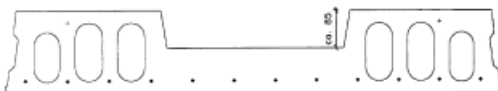
Appartementenvloer

Een variant met een verdikte onderzijde van beton. Op deze manier wordt massa gecreëerd wat benodigd is voor een goede geluidwering zodat er geen overlast van andere bewoners ontstaat.



Leidingvloer

Een vloer waarbij van te voren sleuven aangemaakt worden om leidingen in te plaatsen. Deze sleuven worden fabrieksmatig worden verwerkt waardoor er meestal nog steeds zonder onderstempeling gewerkt kan worden.



Breedplaatvloer



De breedplaatvloer, ook wel bekistingsplaatvloer, is een vloer welke is opgebouwd uit een (voorgespannen)betonschil van 50 tot 80mm met een variërende druklaag. De koppeling met de druklaag wordt gemaakt door tralieliggers zoals op bovenstaande afbeeldingen te zien. Op deze manier is er volledige samenwerking tussen de prefab schil en het in-het-werk-gestorte deel en kan de vloer berekend worden als een normale in het werk gestorte vlakke plaatvloer. De toelaatbare overspanning van de platen is, indien tijdelijk ondersteund, 8m bij traditionele wapening en 10m bij een vorgespannen bekistingsplaat. Het grote voordeel ten opzichte van een vlakke plaatvloer is dat er nauwelijks of geen bekisting benodigd is. Het nadeel ten opzichte van bijvoorbeeld de kanaalplaatvloer is het hoge eigen gewicht van de vloer. De maximale breedte van een element is 3.6m waarbij in de uitvoering altijd de voegen aan de onderzijde van de vloer zichtbaar blijven. Een groot voordeel van de breedplaatvloer is dat leidingen makkelijk in het beton gestort kunnen worden.

Strokenvloer

Een variant van de breedplaatvloer is de strokenvloer. Hierbij worden dikke stroken(versterkte stroken) toegepast in de lengterichting en dunne elementen in dwarsrichting. Dit is vooral een veel gebruikte oplossing bij een kolommenstructuur.



Gewichtsbesparing breedplaatvloer



Ter gewichtsbesparing zijn er meerdere varianten op de breedplaatvloer. Op de afbeelding links de bubbledeck, of bollenvloer. Op de afbeelding rechts de polyplaatvloer. Beide typen vloeren hebben als doel het besparen van gewicht en dus beton in de vloer. De bollen zijn gemaakt van kunststof welke voor een groot deel gevuld zijn met lucht. De polyplaatvloer wordt geleverd met vulblokken van EPS. In beide gevallen is een gewichtsreductie van 25% goed haalbaar.

Wandsystemen

Bij wanden zijn 2 typen belastingen te onderscheiden: Schijfwerking en plaatwerking. Schijfwerking is veelal de belangrijkste functie van een wand, daar deze de stabiliteit van een constructie dient te verzorgen en ook de verticale belasting van bovenliggende vloeren naar beneden dient af te dragen. Stabiliteitswanden worden in de utiliteitsbouw veelal in beton gerealiseerd. In de woningbouw is kalkzandsteen ook een gangbaar bouw materiaal. Wand als plaat worden weinig toegepast, wanneer een wand loodrechte windbelasting op dient te nemen is dat vaak zeer gemakkelijk te realiseren. Enkel in het geval van een kelder of keerwand, wordt een wand ook flink uit zijn vlak belast. In dat geval is er ook plaatwerking aanwezig. Plaatwerking valt buiten de scope van dit afstudeeronderzoek waardoor alleen naar stabiliteit en verticale belasting wordt gekeken. De wandensystemen worden verder beoordeeld op kosten, uitvoerbaarheid, duurzaamheid en gebruikersgemak.

In het werk gestort beton

De monoliete, in het werk gestorte betonwand, is de meest traditionele vorm van een betonwand. Door zijn grote dichtheid zorgt dit type voor een goede geluidswering. Gestort aan een monoliete betonvloer is ook ter plaatse van de aansluiting met andere constructieonderdelen de doordringing van geluid zeer beperkt. Door de grote dichtheid en warmte absorberend vermogen van beton is het zeer geschikt als brandwerend element. De kans op branddoorslag is zeer nihil bij het toepassen van betonwanden. Een ander groot voordeel van in het werk gestort beton is de grote vormvrijheid. In alle mogelijke vormen waarin bekisting gemaakt kan worden is een betonwand te realiseren. Tevens is het maken van verbindingen met in het werk gestort beton zeer gemakkelijk. Verbindingen zijn stijver en kunnen dus goed meewerken in het stabiliteitssysteem. Doordat betonwanden vaak groot zijn en niet volledig uitgenut worden, is het maken van sparingsen dus zeer goed te realiseren. Dit biedt ook grote voordelen voor bijvoorbeeld herbestemming van gebouwen.

Het grootste nadeel voor de uitvoering is het maken van een bekisting en het vlechten van de wapening. Dit zijn beide zeer tijdrovende en dus kostbare bezigheden. In tegenstelling tot betonvloeren is er ook een 2-zijdige bekisting nodig waardoor er meer bekistingmateriaal nodig is. Tot slot geldt voor betonwanden hetzelfde als voor betonvloeren. Er is veel beton, en dus cement, nodig om deze wanden te realiseren. De productie van cement is zeer schadelijk voor het milieu wat een betonwand niet echt een duurzaam alternatief maakt. Door in het werk te storten is er ook relatief veel materiaalverlies waardoor er ook meer uitstoot is dan gewenst. Tot slot is een belangrijk aandachtspunt dat betonwanden door verhinderde krimp makkelijk scheurvorming kunnen vertonen.



Figuur 9: Wapening vlechten 1-zijdig bekiste betonwand

Tunnelbouw

Een variant op in het werk gestorte betonwanden is de tunnelbouw systematiek. Deze is behandeld in de voorgaande literatuurstudie van bouwsystemen omdat dit een geheel systeem betreft van vloeren en wanden.

Holle wand

Een alternatief voor de in het werk gestorte wand is de “holle” wand. Deze wand wordt aangeleverd als 2 schijven waartussen beton gestort wordt. De wandschijven zijn onderling verbonden middels stalen tralieliggers. Bij dit type wand worden de voordelen van prefab (fijne afwerking, bouwsnelheid, uitvoeringskosten en kwaliteit) gecombineerd met de flexibiliteit van in het werk gestort beton. Holle wanden worden in verband met de uitstekende waterdichtheid vaak toegepast in kelders. Daarnaast heeft het alle bouw fysische voordelen van een in het werk gestorte betonwand. Omdat de stornaden, zonder afwerking, in het zicht blijven is het minder geschikt voor de bouw van woningen. Relatief is er iets minder materiaalverlies dan bij in het werk gestort beton, waardoor gesteld zou kunnen worden dat dit type wand iets duurzamer is.



Figuur 10: Volstorten holle betonwand

Prefab



Figuur 11: Plaatsen prefabbetonwand

Tegenwoordig wordt door de druk van de uitvoering steeds vaker prefab wanden toegepast. Prefab wanden hebben net als alle andere prefab onderdelen de voordelen van een hoge kwaliteit, kortere bouw tijd, minder ruimtebeslag op de bouwplaats en lage faalkansen. Het nadeel van prefabbetonwanden is dat de koppeling met andere constructieonderdelen lastig te maken is, zeker wanneer er een grote vormvrijheid geëist wordt. Stekken

moeten binnen de hoofdwapening worden geplaatst waardoor plaatselijk

minder capaciteit is op een moment op te nemen. Voor verbinding die vooral op druk staan is dat geen probleem, maar voor stabiliteit uit bijvoorbeeld kruisjes is dat lastig te realiseren. Voegen zijn altijd een belangrijk aandachtspunt bij het berekenen van een prefab verticaal constructie element. De maximale grootte van de elementen wordt vaak bepaald door de afmetingen van de beschikbare vrachtwagen.

Staal

Wanden van staal worden niet of nauwelijks toegepast. Natuurlijk worden in staalstructuren wel wanden toegepast maar dat is bouwkundige invulling. De wanden in staalconstructies hebben doorgaans geen stabiliserende functie. De stabiliteit van een staalconstructie kan op 3 manieren worden opgelost, te weten:

- Een stabiliteitskern van beton of staal
- Stabiliteit uit portaalwerking
- Stabiliteit door het toepassen van schoren

Stabiliteit uit portalen is vaak lastig te generen dus wordt doorgaans niet veel toegepast. In grote gebouwen is er behoefte aan een trappenhuis en liftschacht waardoor er impliciet al een kern aanwezig is. Het opnemen van de stabiliteitskrachten doormiddel van een kern is dan vaak een voor de hand liggende optie. Bij 1 of 2-laags gebouwen is er niet altijd ruimte of behoefte aan een trappenhuis. In die gevallen is stabiliteit door het toepassen van schoren een zeer geschikte optie.

Staalconstructie zorgen voor een snelle bouwsystematiek maar staal is wel een duur materiaal. Doordat er veel aansluiting zijn tussen de verschillende bouwonderdelen, is een staalconstructie moeilijk brand- en geluidwerend te krijgen. Wel geeft een staalconstructie veel flexibiliteit naar de toekomst omdat een groot deel van de wanden weggehaald kan worden en windverbanden vaak wel verplaatst kunnen worden indien dat gewenst is. Tot slot is staal een relatief duurzaam product omdat het 100% recyclebaar is. Indien er aandacht besteed is aan de verbindingen is het zelfs mogelijk de constructie volledig demontabel en dus herbruikbaar te maken. De productie van traditioneel staal is overigens wel een schadelijk proces voor het milieu.

De bouwkundige invulling van staalconstructies kan op tal van manier worden uitgevoerd. Zie hiervoor het kopje bouwkundige woningscheidende wanden.

Kalkzandsteen

Kalkzandsteen wordt vaak toegepast bij laagbouw. Kalkzandsteen heeft onder druk de mogelijkheid te functioneren als een stabiliteitswand maar indien er geen druk aanwezig is, is de capaciteit nihil. Door de hoge dichtheid en verschillende afmetingen is het geschikt voor verschillende doeleinden als woningbouw, scholenbouw en bedrijfspanden. Het is toepasbaar als binnen en buitenwand. In vergelijking tot prefab wanden is de samenhang met de andere constructieonderdelen nog veel verder beperkt. Wel is er een snelle uitvoering en is er geen uithardingstijd benodigd. Bij de toepassing er erg weinig materiaalverlies waardoor het een relatief milieuvriendelijk materiaal is. en tevens is er een vlakke afwerking. Voor sparingen bestaan er ook kalkzandsteen lateien waardoor het eenvoudig is om deur- en raamsparingen op te nemen. Wel is de beschikbare lengte van deze elementen beperkt. Voor de grotere lengte is het goed mogelijk om een betonlatei in te metselen zonder veel extra handelingen. Kalkzandsteen is een relatief duurzaam materiaal. De CO₂ emissie* is lager dan bij beton en het is een stuk beter herbruikbaar door het ontbreken van wapening. Wel is het van belang dat bij de sloop van het gebouw de materialen goed gescheiden worden. Kalkzandsteengranulaat is goed bruikbaar bij de productie van nieuwe kalkzandsteenblokken of als onderlaag bij de bouw van wegen**.



Figuur 12: Ingemetselde betonlatei

* http://www.xella.nl/productie_2675.php

** http://www.xella.nl/recycling_2677.php

Bouwkundige woningscheidende wanden

Voor bouwkundige wanden tellen verschillende eisen. Voor de gebruikers is de belangrijkste hiervan is de geluidsisolerende waarde van de wand. Volgens onderstaande tabel van het bouwbesluit is de vereiste geluidwering 59dB.

gebruiksfunctie					leden van toepassing													grenswaarden									
					ander perceel				verschillende gebruiksfunctie op hetzelfde perceel								verblijfsruimten van dezelfde woonfunctie			verbouw		tijdelijke bouw		ander perceel		verschillende gebruiksfunctie op hetzelfde perceel	
					artikel	3.16				3.17								3.17a			3.18		3.19		3.16		3.17
lid					1	2	3	4	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	*	*	3	4	3	4		
																								[dB]		[dB]	
1 Woonfunctie																											
a woonwagen					-				-								-			-							
b in een woongebouw					1	2	3	4	1	2	3	4	-	6	7	-	1	2	3	*	*	54	59	54	59		
c voor studenten in een woongebouw					1	2	3	4	1	2	3	4	-	6	7	8	1	2	3	*	*	54	59	54	59		
c andere woonfunctie					1	2	3	4	1	2	3	4	-	-	-	-	1	2	3	*	*	54	59	54	59		

Er is veel informatie beschikbaar van bouwkundige woningscheidende wanden omtrent de geluidwerendheid. Hierbij moet veel aandacht besteed worden aan de details van de aansluiting op de onderlinge elementen maar ook op de aansluiten met de omliggende constructie. Deze is cruciaal om de geluiddichtheid van de wanden te kunnen garanderen. Doorgaans bieden de meeste woningscheidende wanden met een goede geluidwering ook een hoge brandwerendheid van 90 minuten, welke vaak op te hogen is tot 120 munten waardoor dat gedeelte is afgedekt.

De kosten voor woningscheidende wanden zijn volgens bouwkosten-online.nl zo'n 100€ per vierkant meter. Voor een vergelijk met andere typen wanden moet voor de kosten en CO₂ emissie gekeken naar de deze aspecten van de wand maar ook naar de extra constructie en handelingen hiervoor benodigd zijn. Voor een gedegen vergelijk worden de kosten en CO₂ emissie gedeeld over het wandoppervlak. De CO₂ emissie van bouwkundige wanden is lastig te achterhalen. Volgens een opgave van FAAY ligt de emissie van hun woningscheidende wanden tussen de 76 en 81kg/m². Dit wordt vooral veroorzaakt door de productie van gips en vlasplaten.

Duurzaamheid algemeen

Duurzaamheid is tegenwoordig een vergaarbak van begrippen geworden. Allerlei aspecten worden onder het kopje duurzaamheid geplaatst en het gevoel bij het begrip raakt een beetje kwijt. De meest gangbare methode om duurzaamheid te beschrijven is aan de hand van de 3 p's.

- People
- Profit
- Planet

De internationale definitie van duurzaamheid laat zich als volgt luiden:

“Duurzame ontwikkeling is de ontwikkeling die aansluit op de behoeften van het heden zonder het vermogen van de toekomstige generaties om in hun eigen behoeften te voorzien in gevaar te brengen”*. Voor elk onderdeel van de samenleving, en dus ook gebouwen, kan je deze aspecten bekijken en kwantificeren naar duurzaamheid.

Het materiaal gebruik in een gebouw bestaat voor ongeveer 30% uit constructieve elementen. Je zou bij een dergelijk percentage denken dat dit een groot onderdeel is om te bepalen of een gebouw duurzaam is of niet. Gek genoeg is dat lang niet altijd het geval. Uit bijvoorbeeld een BREEAM test blijkt dat de keuze in de constructie of de hoeveelheid materiaalgebruik in een constructie, nauwelijks invloed heeft op de score.

Uit bovenstaande zou geconcludeerd kunnen worden dat het voor een aannemer of gebruiker van een project, beter is om de focus te leggen op andere onderdelen welke een grotere impact hebben op de score en dus zeer waarschijnlijk op de daadwerkelijk duurzaamheid over de levensduur. Toch wil dat niet zeggen dat een constructeur duurzaamheid kan negeren. Hij kan op in zijn eigen vakgebied bijdragen aan duurzaamheid op verschillende manieren. De invloed op de BREEAM score is dan niet groot maar de invloed op het milieu is wel degelijk aanzienlijk zijn.

Dit afstudeer onderzoek richt zich enkel op de uitstoot van CO₂. Hierbij wordt enkel gekeken naar de uitstoot van de constructieve, dragende elementen. De CO₂ wordt uitgedrukt in kg. De emissie van 1 kg CO₂ staat gelijk aan**:

- Productie van 5 plastic draagtassen
- het rijden van 6 km met de auto
- 12 km reizen met het ov.

*<http://www.platformduurzaamheid.net/index.php?/Wat-is-Duurzaamheid/achtergrond-duurzaamheid/wat-is-duurzaamheid.html>

** Afstudeer onderzoek Ali Hosseini bij ABT en Hogeschool Rotterdam: Milieu-impact van Constructieve ontwerpen

Opbouw schaduw prijzen volgens “wijzer met LCA”

Tegenwoordig worden van producten niet enkel de emissie van CO₂ in kaart gebracht maar wordt er middels een Life Cycle Analyse(=LCA) in kaart gebracht wat de totale impact van de keten op het milieu is. Hierbij worden 11 indicatoren gebruikt om de invloed op het milieu te bepalen. Het aantal indicatoren verschilt per onderzoek en LCA maar de meest gangbare indicatoren zijn weergegeven in Tabel 1*. Deze indicatoren hebben allen op een andere wijze invloed op het milieu maar worden allemaal uitgedrukt in geld. Dit zijn fictieve prijzen, puur om inzicht te verschaffen op de impact op het milieu en om het goed mogelijk te maken om afzonderlijke onderdelen te vergelijken.

Milieueffectcategorie	Equivalent eenheid	Weegfactor [€ / kg equivalent]	
Uitputting abiotische grondstoffen (exclusief fossiele energiedragers) – ADP	Sb eq	€ 0,16	Grondstoffen
Uitputting fossiele energiedragers – ADP	Sb eq ⁶	€ 0,16	
Klimaatverandering – GWP 100 j.	CO ₂ eq	€ 0,05	Emissies
Aantasting ozonlaag – ODP	CFK-11 eq	€ 30	
Fotochemische oxidantvorming – POCP	C ₂ H ₄ eq	€ 2	
Verzuring – AP	SO ₂ eq	€ 4	
Vermeesting – EP	PO ₄ eq	€ 9	
Humane toxiciteit – HTP	1,4-DCB eq	€ 0,09	
Zoetwater aquatische ecotoxiciteit – FAETP	1,4-DCB eq	€ 0,03	
Mariene aquatische ecotoxiciteit - MAETP	1,4-DCB eq	€ 0,0001	
Terrestrische ecotoxiciteit – TETP	1,4-DCB eq	€ 0,06	

Tabel 1: Indicatoren LCA

Soms worden bovenstaande indicatoren nog uitgebreid met de ecotoxiciteit van de bezinksels in zoet- en zee water.

In dit onderzoek wordt geen gebruik gemaakt van deze schaduw prijzen. Er is onderzoek gedaan naar duurzaamheid in zijn algemeenheid en er worden ontwerpen afgewogen op basis van CO₂ emissie en kosten. CO₂ heeft de grootste invloed op het milieu en ook op de schaduw prijs waardoor het belangrijkste onderdeel is uitgelicht. Voor een definitieve uitspraak over de milieu-impact van constructieonderdelen wordt verwezen naar andere onderzoeken.

*http://www.duurzaaminstaal.nl/upload/File/20141125_SBK_Bepalingsmethode_versie_2_0_definitief.pdf

Duurzaamheid beton

Het productie en transportproces van constructieve materialen zijn van grote invloed op het milieu. Indien men kijkt naar de gemiddelde uitstoot CO₂ bij de productie van cement kunnen de volgende gemiddelde kernwaarden gehanteerd worden*.

Voor de drie gemiddelde referentiecementen is dat:

- CEM-I NL -> 818kg CO₂ per ton portlandcement
- CEM-II NL -> 486kg CO₂ per gemiddelde ton cement
- CEM-III NL -> 269kg CO₂ per ton hoogovencement

Indien dit cement verwerkt is in beton komt men tot de volgende waarden voor de gemiddelde CO₂ emissie van beton C30/37*:

- Beton met CEM-I NL -> 252kg CO₂ per kubieke meter beton
- Beton met CEM-II NL -> 161kg CO₂ per kubieke meter beton
- Beton met CEM-III NL -> 92kg CO₂ per kubieke meter beton

In de huidige bouwwereld worden doorgaans de cementsamenstelling gehanteerd zoals in Tabel 2 is weergegeven. Deze samenstelling wordt met name bepaald door de benodigde snelheid van ontkisten. CEMI heeft een sneller hardingsproces waardoor de benodigde er bij een sneller proces meer CEMI wordt toegepast.

	Hoogovencement(CEMIII)	Portlandcement(CEMI)
IHW gestort >10°C	100%	0%
IHW gestort < 10°C	75%	25%
IHW korte ontkisttijd	50%	50%
prefab snel	0%	100%
prefab normaal	25%	75%
prefab groen	55%	45%
NL gem. mengsel	65%	35%

Tabel 2: Cementsamenstelling bij betonconstructies

Wapening met een karakteristieke vloeispanning van 500N/mm² heeft een CO₂ emissie van 1350kg per ton geproduceerd staal.

Classificatie groen beton

Beton is tot nog toe doorgaans geen duurzaamconstructie materiaal. Om hier verandering in aan te brengen is tijdens het "Eco-Crete International symposium" over duurzaamheid van betonconstructies door ijslandse onderzoekers onderstaande tabel met de classificering van groen beton gepubliceerd**. Op dit moment behoort dit nog niet tot een norm of toetsingsrichtlijn maar is dit wel een interessant aandachtspunt bij het ontwerpen van een betonconstructie en samenstellen van een betonmengsel.

Tabel 1 Classificatie van groen beton op basis van de carbon footprint

nr.	klasse	carbon footprint [kg CO ₂ /m ³ beton]
1	Semi-LCC	≤ 300
2	LCC250	≤ 250
3	LCC200	≤ 200
4	LCC150	≤ 150
5	EcoCrete	≤ 125
6	EcoCrete Xtreme	≤ 105

LCC = low carbon concrete classes [3]

*<http://www.cementenbeton.nl/duurzaam-bouwen/beton-en-milieu/milieuprestaties-cement>

** <https://www.cementonline.nl/artikel/sterkte-als-stuurknop-voor-milieubelasting>

Impact sterkte- en milieuklasse

In bovenstaande inleiding is gebruik gemaakt van gemiddelde waarden voor in Nederland toegepast beton, cement en wapening. De invloed van de betonsterkteklasse en milieuklasse komt hierin niet naar voren. Voor het bepalen van de CO₂ emissie van een betonconstructie is deze wel van belang. Cement is een belangrijke factor voor de CO₂ emissie van een betonconstructie. De hoeveelheid toe te passen cement is vaak afhankelijk van de betonsterkteklasse welke op zijn beurt weer, onder andere, afhankelijk is van de milieuklasse. Voor de analyse van de CO₂ emissie worden de volgende waarden gehanteerd voor de hoeveelheid cement per betonsterkte- en milieuklasse.

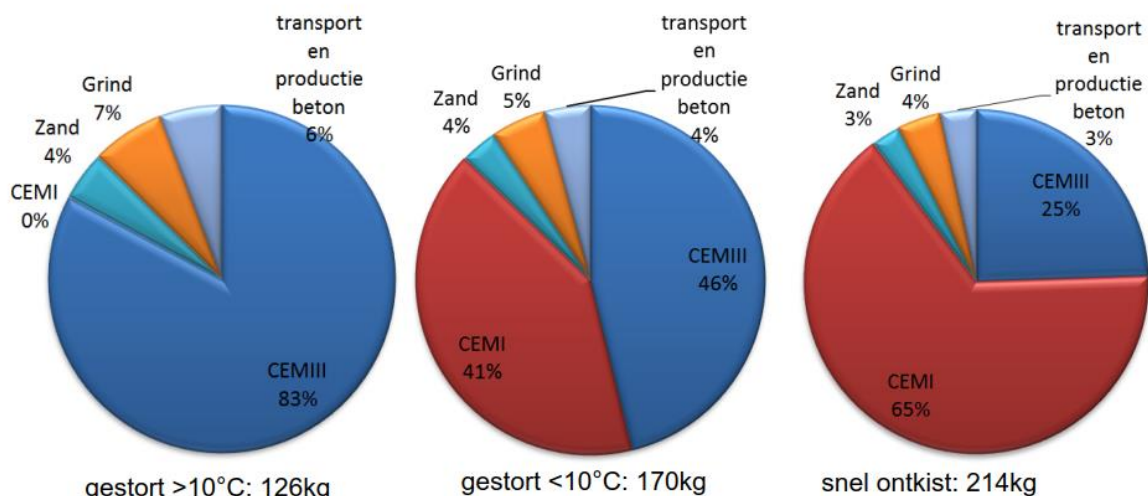
milieuklasse	max. wcf	min. Cementgehalte	C12/15	C20/25	C30/37	C35/45	C45/55	C53/65	C60/75	C70/85	omschrijving milieu
X0	0,70	200	230	250	280	310	340	360	380	400	Geen risico op corrosie of aantasting
XC1	0,65	260	260	280	305	330	350	370	400	420	Carbonatatie; droog of blijvend nat
XC2	0,60	280	290	305	320	340	360	380	405	425	Carbonatatie; nat, zelden droog
XC3	0,55	280	300	315	330	350	370	390	410	430	Carbonatatie; matige vochtigheid
XC4	0,50	300	325	335	345	360	380	400	430	450	Carbonatatie; wisselend nat en droog
XD1	0,55	300	300	320	340	360	380	400	430	450	Dooizouten, chloriden; matige vochtigheid
XD2	0,50	300	325	335	345	360	380	400	430	450	Dooizouten, chloriden; nat, zelden droog
XD3	0,45	300	370	380	380	390	400	410	430	450	Dooizouten, chloriden; wisselend nat en droog
XS1	0,50	300	325	335	345	360	380	400	430	450	Zeewater; zouthoudende lucht
XS2	0,45	300	370	380	380	390	400	410	430	450	Zeewater; blijvend onder water
XS3	0,45	320	370	380	380	390	400	410	450	470	Zeewater; getijde-, spat- en stuifzone
XF1	0,55	300	300	320	340	360	380	400	430	450	Vorst; geen dooizouten; niet-volledig verzadigd met water
XF2	0,45	300	370	380	380	390	400	410	430	450	Vorst; geen dooizouten; verzadigd met water
XF3	0,50	300	325	335	345	360	380	400	430	450	Vorst; wel dooizouten; niet-volledig verzadigd met water
XF4	0,45	320	370	380	380	390	400	410	450	470	Vorst; wel dooizouten; verzadigd met water
XA1	0,55	300	300	320	340	360	380	400	430	450	Agressief; zwak agressieve omgeving
XA2	0,50	320	325	335	345	360	390	410	440	470	Agressief; matig agressieve omgeving
XA3	0,45	340	370	380	380	390	400	420	440	470	Agressief; sterk agressieve omgeving

Tabel 3: Cement gehalten in betonconstructie per sterkte- en milieuklasse in kg/m³ beton

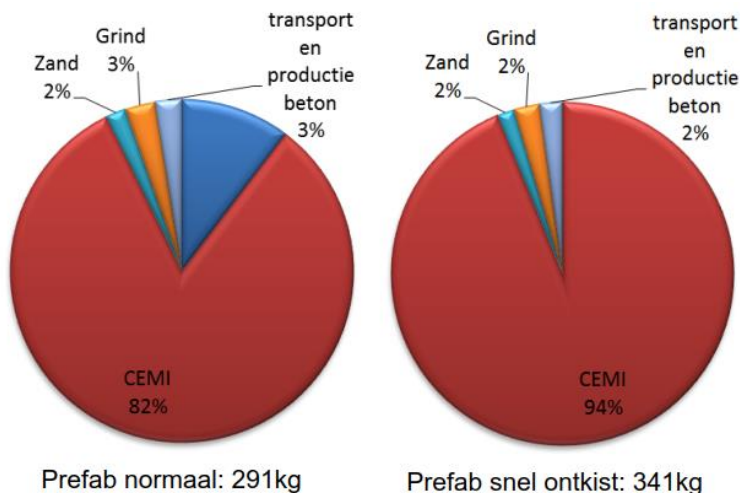
Prefab- versus in het werk gestort beton

Zoals hierboven reeds beschreven is de hoeveelheid en het type cement zeer bepalend voor de CO₂ emissie van een betonconstructie. In het werk gestort beton bevat doorgaans, afhankelijk van de benodigde ontkisttijd en de temperatuur ten tijde van storten, veel CEMIII gebruikt in het betonmengsel. De gemiddelde betonsterkteklasse daarbij is C30/37. Bij prefabbetonconstructies wordt altijd gestreefd naar een snelle ontkisting en is de betonkwaliteit vaak minimaal C45/55.

Onderstaand worden een simpele vergelijking gemaakt van 1m³ per geproduceerd product voor verschillende betonsamenstellingen en wordt tevens onderscheid gemaakt tussen prefab en in het werk gestort beton uitgaande van de betonsamenstellingen zoals weergegeven in Tabel 2 uitgaande van de betonkwaliteit zoals in voorgaande paragraaf beschreven. In deze figuren zijn percentages kleiner dan 1% weggelaten en rekening gehouden met de transport afstanden zoals gestelde in de ISO1401.



Figuur 13: CO2 emissie verschillende in het werk gestorte beton toepassingen



Figuur 14: CO2 emissie verschillende prefabbeton toepassingen

Hieruit kan men direct kunnen concluderen dat in het werk gestort beton duurzamer is dan prefabbeton en dat snel ontkisten slecht is voor het milieu. Het onderscheid prefab- en in het werk gestort is echter niet zo gemakkelijk te maken omdat de invloed van wapening en een eventuele geometrie verkleining door de hoge betonkwaliteit niet wordt meegenomen.

Vergelijking lineaire beton/wapeningsverhoudingen

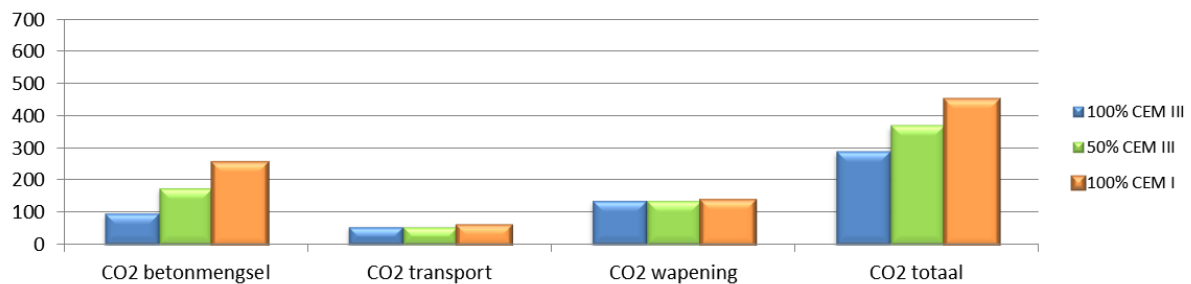
Indien men betonelementen, met name op buiging als lineaire elementen zou beschouwen geldt dat bij een verdubbeling van de hoogte, de wapening in de doorsnede gehalveerd kan worden. Andersom kan dat ook, bij een halvering van de doorsnede, moet de wapening verdubbeld worden. Mits we niet gehinderd zijn door praktische grenzen, en het minimum en maximum wapeningspercentage zou je dit tot in de oneindigheid kunnen doorvoeren. Voor vloeren is het vrij gangbaar om een wapeningsverhouding van 100kg/m³ beton aan te houden. Maar is dat ook het meest duurzaam?

Verschillende wapeningsconfiguraties

In basis zou dat bij de toepassing van verschillende cementkwaliteiten de volgende resultaten m.b.t. CO₂ emissie en kosten geven:

Uitgangspunt: 1m ³ beton en 50km transport		
100kg/m ³	CO ₂ emissie(kg CO ₂ /m ³)	Bouwkosten(€)
100% CEM III	291	212
50% CEM III	370	215
0% CEM III	450	217

Indien we dit meer grafisch maken zien we een grafiek zoals getoond in Figuur 15.

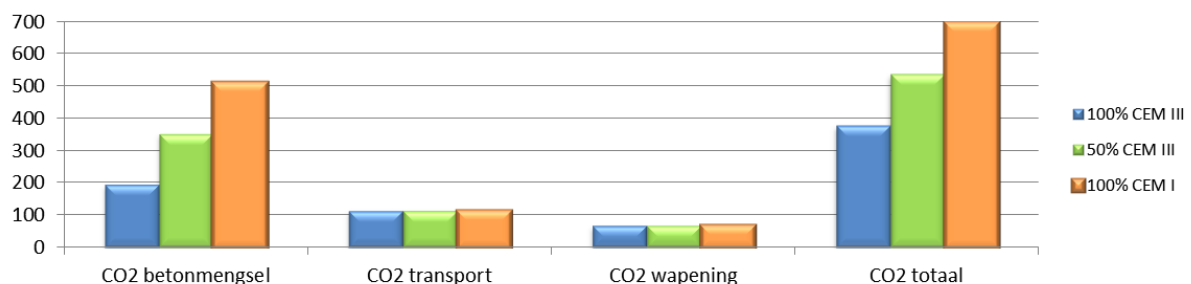


Figuur 15: CO₂ emissie voor 1m³ gewapend beton (100kg/m³)

Indien we de doorsnede verdubbelen en dus de wapening halveren krijgen we met dezelfde uitgangspunten onderstaande tabel:

Uitgangspunt: 2m ³ beton en 50km transport		
25kg/m ³	CO ₂ emissie(kg CO ₂ /m ³)	Bouwkosten(€)
100% CEM III	378	237
50% CEM III	536	241
0% CEM III	696	246

In grafiekvorm geeft dat onderstaand beeld:



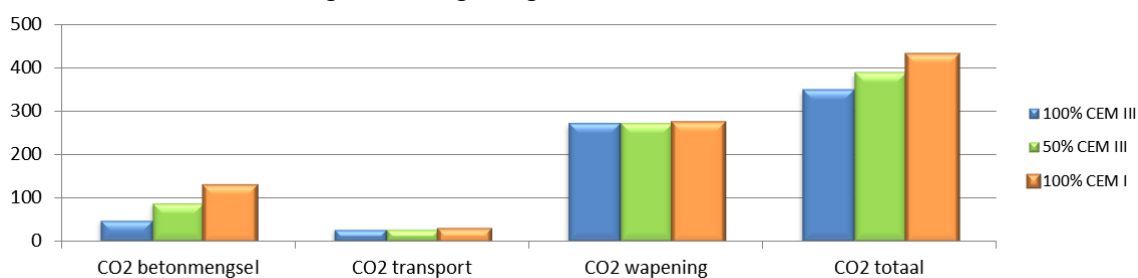
Figuur 16: CO₂ emissie voor 2m³ gewapend beton (25kg/m³)

Hierin wordt duidelijk dat hier niet efficiënt is om de betonconstructie in hoogte te verdubbelen. Dat geldt voor zowel de kosten als de CO₂ emissie. Wel wordt het contrast steeds groter bij de keuze voor de cementsoort, deze is bij grotere hoeveelheden beton zeer bepalen voor de CO₂ emissie.

Omgekeerd zou men eenzelfde beeld verwachten bij het halveren van de betonconstructie en dus verdubbelen van de wapening. Dat is niet het geval. De constructie wordt duurder en de CO₂ emissie gaat omhoog.

Uitgangspunt: 0,5m ³ beton en 50km transport		
400kg/m ³	CO ₂ emissie(kg CO ₂ /m ³)	Bouwkosten(€)
100% CEM III	350	294
50% CEM III	389	295
0% CEM III	429	296

Grafisch heeft dat het volgende tot gevolg:



Figuur 17: CO₂ emissie voor 0.5m³ gewapend beton (400kg/m³)

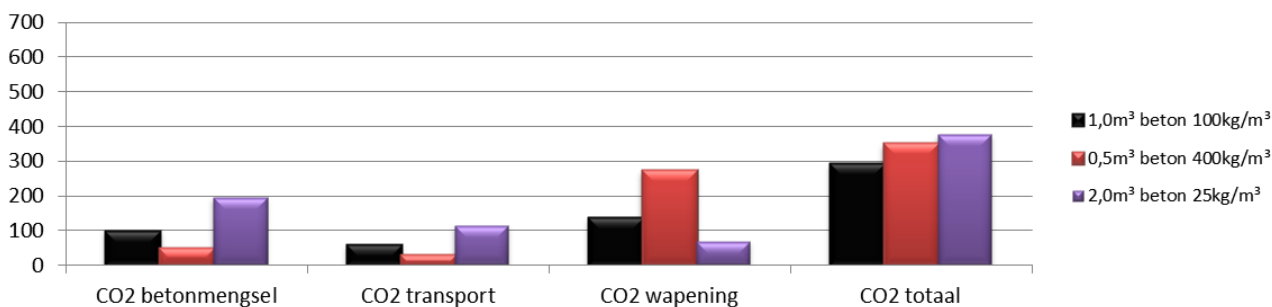
Uit bovenstaande beschouwingen blijkt dat de optimale vorm ergens in het midden ligt en in de buurt komt van de bestaande ontwerpvuistregels. Dat geldt voor zowel de kosten als voor CO₂ emissie. De optimale vorm zou voor beide aspecten bij elkaar in de buurt kunnen liggen. Tevens kan geconcludeerd worden dat de keuze voor de cementsoort voor de kosten nauwelijks invloed heeft terwijl de impact voor de CO₂ emissie enorm is.

Verschillende cement soorten

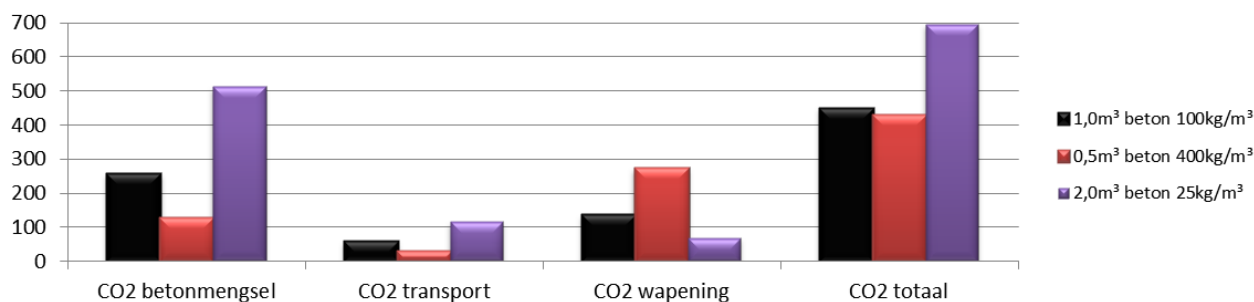
CO₂ emissie

Als we bovenstaande varianten voor de verschillende betonsamenstellingen vergelijken is te zien dat de gekozen geometrie bij hoogovencement niet heel erg veel invloed heeft op de CO₂ emissie van de totale constructie, zie Figuur 18.

Maken we eenzelfde vergelijking met portlandcement, dan is in Figuur 19 te zien dat de vorm daar erg veel invloed kan hebben op de CO₂ emissie van de constructie. Dat geldt met name voor zware constructies met een lichte wapeningsconfiguratie. Bij grootschalig gebruik van CEMI is het dus van belang dat er geoptimaliseerd wordt in de buitenafmetingen van de betonconstructie. CEMI wordt vooral veel toegepast in de prefab industrie waarin de vorm, mede voor transport, maar ook voor de kosten doorgaans goed geoptimaliseerd wordt. Dat is dus een goede zaak.



Figuur 18: CO₂ emissie bij 100% hoogovencement bij lineaire beton/wapeningsverhoudingen

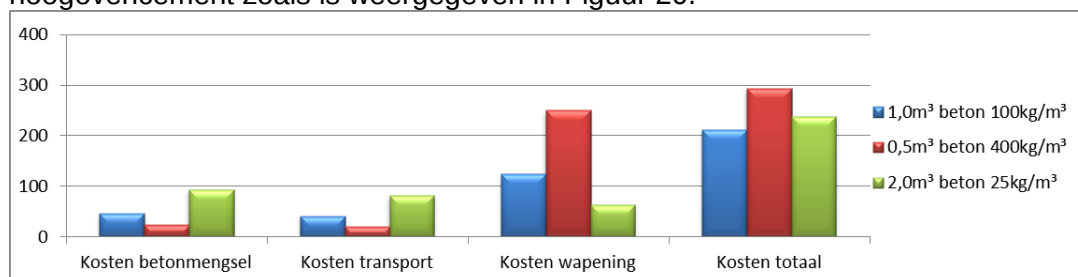


Figuur 19: CO2 emissie bij 100% portlandcement bij lineaire beton/wapeningsverhoudingen

Kosten

Identiek aan bovenstaande vergelijking is ook een vergelijking van de kosten gemaakt. CEMI is ongeveer 20% duurder dan CEMIII, daarom zou het voor de hand liggen, puur kijkend naar het materiaalgebruik, om CEMI toe te passen. Echter heeft de keuze van het cement slechts voor ongeveer 5- tot 10% invloed op de kosten van een betonconstructie, waardoor de invloed van de cementkeuze slechts voor 1- tot 2% invloed heeft op de uiteindelijke kosten. Andere aspecten als bijvoorbeeld het uitharden en mogelijkheid tot snel ontkisten van een constructie zijn doorgaans dus veel belangrijker dan de keuze voor de cementsoort.

Doordat de invloed op de prijs nihil is, is voor de kosten enkel een vergelijking gemaakt voor hoogovencement zoals is weergegeven in Figuur 20.



Figuur 20: Kosten bij 100% hoogovencement bij lineaire beton/wapeningsverhoudingen

Logischerwijs blijkt uit bovenstaande afbeelding dat de wapening bij slanke constructies voor een groot deel de kosten bepaald. Bij andere constructies is dat minder, maar blijft de invloed nog sterk aanwezig.

Duurzaamheid staal

De staalindustrie heeft bij de productie grote behoefte aan energie. Bij de productie van normaal constructiestaal wordt per ton staal ongeveer 900kg CO₂ uitgestoten*. Dat maakt staal opzichzelf een heel schadelijk materiaal mits het niet hergebruikt zou worden. Staal is echter 100% recyclebaar en dat gebeurt in Nederland ook volop. Op dit moment wordt 80% van het balkstaal geproduceerd uit schrootstaal(gebruikt staal**). Door de grote mate van hergebruik is de uiteindelijke CO₂ emissie per ton bereidt product “slechts” 480kg.

CO₂ emissie van een staalconstructie is onafhankelijk van de gekozen materiaalsoort mits wordt gekeken naar de staalkwaliteiten S235, S355 en S460. Het enige onderscheid tussen de verschillende materialen is de walsmethode en koeltechniek. Dit zijn de “normale” staalsoorten. Hoge sterktestaal S690, S890, S960 en S1100 hebben een andere samenstelling met een hoger koolstofgehalte, zijn duurder en hebben een hogere emissie***. Behalve deze vernoeming worden deze materialen buiten beschouwing gelaten. Bij roestvrijstaal ligt de emissie een factor 10 hoger dan een dan bij gewoon staal met dezelfde eigenschappen.

Indien staal gerecycled wordt is het niet nodig om de sterkte van het oorspronkelijke product te gebruiken. Schrootstaal S235 kan gemakkelijk worden opgeschaald worden naar S460 staal. Toevoeging van extra energie of extra materialen is niet nodig.

Brandwerende bekleding

Voor de brandwerende bekleding wordt voor de CO₂ emissie uitgegaan van de waarden zoals weergegeven in “Duurzaam construeren met materialen”*. Voor een brandwerendheidseis van 30min geldt een benodigde dikte van 15mm wat gelijk staat aan een emissie van 19kg/m². Volgens de informatie van verschillende leveranciers is bij een brandwerendheidseis van 60min een dikte van 20mm benodigd, gelijk aan 25kg/m². Voor een eis van 90min is een dikte van 30mm benodigd, 38kg/m². Brandwerende bekleding is dus geen duurzaam materiaal en moet zoveel mogelijk voorkomen worden.

*<http://www.vnconstructeurs.nl/Upload/Documenten/20140423%20Reader%20Duurzaamheid%20construeren%20met%20materialen.pdf>

** <http://www.duurzaaminstaal.nl/>

*** http://www.duurzaaminstaal.nl/upload/File/BMS_235_S235.pdf

Bijlage D: Praktijkonderzoek

Interviews

Interview met Geert van Oost, directeur abtWassenaar

Duurzaamheid

- *Hoe is jouw kijk op duurzaamheid van constructies? Vind je het relevant?*
Duurzaamheid wordt steeds belangrijker in de samenleving maar bij constructies, ons vak, komt het toch erg weinig naar voren. Opdrachtgevers zijn nauwelijks geïnteresseerd om extra te betalen voor een meer duurzame constructie. Louter wanneer het geld kan opleveren, is een opdrachtgever geïnteresseerd. Het is erg jammer dat er weinig aandacht aan besteed wordt omdat er wel mogelijkheden liggen. Maar zelf lopen we daarin ook niet voorop.
- *De invloed van constructie op een BREEA-score is klein, maar de impact op het milieu kan wel groot zijn, maakt dat duurzaamheid zinloos of zinvol in jou ogen?*
Bij BREEAM is het onderdeel constructies erg ondergeschikt. Inmiddels zijn er wel andere bewegingen als een Life-cycle-analyse en CO₂-neutraal bouwen, waardoor het meer onder de aandacht gebracht kan worden.
- *Zie je duurzaamheid terug in onze ontwerpen/In welke zin wordt er rekening gehouden met duurzaamheid?*
In onze ontwerpen is het niet terug te zien.
- *Zie jij kansen of verplichtingen voor ons als bedrijf op het gebied van duurzaamheid?*
Verplichtingen zijn er nauwelijks, kansen moeten aanwezig zijn maar waar deze precies liggen dat weet ik niet. Verplichtingen zijn er pas indien een opdrachtgever een duurzaam gebouw wil. Zoals eerder gezegd zijn ze eigenlijk zelden bereid om dat te betalen.
Als wij in staat zijn om weer te geven hoe duurzaam een constructie is, zie ik daar wel kansen. Ik vind het noodzaak dat we er iets mee gaan doen, alleen weten we niet goed genoeg hoe. Als wij bijvoorbeeld kunnen weergeven hoeveel CO₂ een bepaalde constructie uitstoot, zouden we wel eens een unieke positie in de markt kunnen creëren.
- *Wat zijn doorgaans de parameters bij aanbesteding? In welke verhouding komt duurzaamheid en constructiekosten aan bod?*
Doorgaans zijn er geen punten te scoren bij een aanbesteding op het gebied van duurzame constructies. Wel worden er wel eens kreten geschreven dat het project duurzaam moet zijn. Het is niet zo dat een aanbesteding wel of niet wordt omgezet in een opdracht doordat een constructie duurzaam ontworpen is. Wij handelen dat af met algemene kreten in onze aanbestedingen. We omschrijven dat we er rekening mee houden maar vervolgens zie je het niet specifiek terug.
- *Worden er wel eens eisen gesteld aan een maximale CO2 emissie van constructies?*
Nee, er wordt met name gekeken naar de gebruiksfase van het gebouw.

Bouwkosten/kostenmanager

- *Wij hebben spreadsheets(kostenpeil 2009) om wat kosten in te schatten, wat doen wij verder met kosten?*
De verhouding van constructieonderdelen onderling is met name van belang. Dus hoeveel procent duurder is een breedplaatvloer t.o.v. een kanaalplaatvloer. Op die manier kan je een goedkoop ontwerp afleveren zonder de exacte kosten te weten.

- *Is dat de ervaring van een ontwerper? Weten zij meer richtprijzen?*
Onze projectleiders en ontwerpers hebben door ervaring veel gevoel voor prijzen. Ze weten geen exacte prijzen maar wel een richting. Deze ervaring is opgedaan in de vroegere jaren als constructeur. Vroeger kreeg een constructeur veel meer begrotingen onder ogen waaruit de kosten van het ontwerp konden worden afgeleid. Nu is dat minder waardoor het inzicht in kosten voor jonge constructeurs veel moeilijker te verkrijgen is.
- *Waarom is het voor jonge constructeurs zo lastig om deze ervaring op te doen?*
Daarvoor heb je beschikking nodig over begrotingen. Kan je zelf begrotingen opstellen en ondervinden wat je daarvoor nodig hebt. Op dit moment zouden we binnen ABT onze plan kunnen opsturen naar een kostenmanager en vragen wat de verschillende ontwerpen kosten.
- *Wat is het verschil tussen het opstellen een raming en een begroting?*
Een begroting bevat al een uitgewerkt plan. Van elk element wordt de prijs bepaald, de arbeid bepaald en alle extra kosten uitgerekend. Onder de streep wordt er ook winst en risico gerekend waardoor er een prijs voor de opdrachtgever ontstaat. Bij het maken van een raming weet je nog niet zoveel over het project. Gedurende het proces wil je een inschatting te maken van de kosten. Op basis van vierkante meters en kilo's met marge.
- *Maken wij wel eens gebruik van een kostenmanager?*
Nee, een kostenmanager wordt met name gebruikt voor het maken van begrotingen. Wij maken zelf geen begrotingen omdat wij die disciplines niet zelf in huis hebben. ABT heeft ervoor gekozen om projecten integraal aan te pakken met verschillende disciplines waar het maken van begrotingen er 1 is.
- *Zou een kostenmanager waardevol kunnen zijn voor ons?*
Pas vanaf het moment dat wij een meer integraal bureau zijn, waarbij het maken van een begroting een onderdeel van onze aanbieding word, kan dat relevant zijn.

Integraal ontwerpen

- *Hoe zou jij integraal ontwerpen omschrijven?*
Het is lastig om een exacte definitie te geven van integraal ontwerpen. Bij integraal ontwerpen probeer je in overleg met andere partijen tot het meest optimale ontwerp te komen. Je kijkt niet meer sec naar de kosten van een constructie en vertelt vervolgens de installateur dat hij zijn installaties er maar omheen moet leggen. Er wordt overleg gepleegd tussen verschillende partijen om samen tot een zo efficiënt en betaalbaar mogelijk project te komen.
- *Welke partijen zouden daarbij betrokken moeten zijn?*
Bij elke project is in ieder geval een architect betrokken. Zonder architect is er geen ontwerp, geen vorm en dus geen gebouw. Daarnaast is natuurlijk een constructeur van belang maar moeten ook andere partijen, als een installateur of aannemer er zoveel mogelijk bij betrokken raken.

- *Waarom willen wij andere partijen in huis hebben om integraal te ontwerpen?*
Het is voor een opdrachtgever makkelijker zijn om 1 aanspreekpunt te hebben. Je levert meer diensten dan wanneer je een singulariteit bent. Je hebt korte lijntjes waardoor de levertijd veel korter is dan bij wanneer je allemaal losse partijen voor je aan het werk zet die wij aansturen. Interne kosten zijn veel minder van belang, bij externe partijen zijn alle extra handelingen duurder. Nu heb je risicospreiding.
- *In hoeverre vind jij dat onze jonge constructeurs dat kunnen?*
Onze constructeurs kunnen dat allemaal, alleen op basis van ervaring kun je dit veel verder uitbreiden.
- *Hoe zouden we de constructeurs kunnen opleiden om dat meer in de vingers te krijgen?*
Zolang je niet geconfronteerd wordt met wat er fout gaat in ontwerptrajecten, is het heel lastig om dit onder controle te krijgen. Hiervoor moet je fouten maken, meemaken. Het is onmogelijk hier een leidraad voor te schrijven. Op basis van ervaringen kan je dat bijsturen.

Installaties

- *Is een installateur vaak betrokken bij een integraal ontwerp?*
Steeds meer. Vroeger waren wij sterk naar binnen gericht. Zowel de installateur als de opdrachtgever wilden hun eigen werk optimaal blijven doen en zo min mogelijk last hebben van andere partijen. Als we last hadden van andere partijen kostte ons dat tijd en dus geld. Ons honorarium kwam op die manier onder druk te staan. Tegenwoordig zitten partijen, vroeger in het ontwerp, samen om tafel. Op die manier hoeven we geen verstand te hebben van installaties maar kan het honorarium beter in verhouding staan tot de kosten in de praktijk.
- *Waarom komt deze man altijd overal een fase te laat?*
Traditioneel is een installateur pas later in het traject onderdeel van een project. Ze zijn gewend alles maar één enkele keer te tekenen waardoor meedenken tijdens het constructief ontwerpen afwijkt van zijn gebruikelijke werkpakket. Het vergt tijd voordat dit volledig integraal te benaderen is.
- *Ligt dat aan hem of aan de aansturing?*
Vaak omdat de architect deze rol veel op zich neemt in het begin. Een architect heeft een klein beetje verstand van constructies en wij een klein beetje van een architect. Van installaties heeft een architect vaak voldoende kennis van, om een bouwkundig ontwerp op te zetten. Hij is zich bewust van schachten, leidingen, plafonds en technische ruimten. Zolang een architect en opdrachtgever het gevoel heeft deze expertise niet nodig te hebben handelt hij hier zelf in.
- *Zie jij daar oplossingen voor?*
De mindset van de architect en opdrachtgever moet veranderen. Tevens neemt het honorarium van een installateur op die manier toe. Er moet inzicht verschaft worden, dat het een groter honorarium van de installateur uiteindelijk voor minder kosten op de bouw gaat zorgen. De installateur is hier zelf ook verantwoordelijk voor, om dat uit te dragen en opdrachtgevers te overtuigen.

Interview met Koos ten Berge, adviseur bij Constar Prefab bv

Duurzaamheid

- *Wat is je kijk op duurzaamheid van constructies?*
Net als alle andere bedrijven zijn wij bezig met duurzaamheid. De vrachtwagens voldoen aan de euro norm, maar dat is ook vereist. We werken aan zonnecellen op het dak om de benodigde energie duurzaam op te wekken. Maar het echte product is moeilijk duurzaam te leveren. Cement is een enorme vervuiler en hier is nog geen vervanging voor gevonden. Het is mogelijk om grind te vervangen met granulaat, daarvan is de levering nog niet constant. Het grootste obstakel om betongranulaat toe te passen is de certificering. Daarbij moet je partijkeuring hebben op hebben op je voorraad. Dat kost geld en levert voorlopig niks op.
 - *Kan de prefabindustrie een bijdrage leveren aan duurzaamheid dan het traditioneel gestorte beton?*
In onze fabriek zijn er nauwelijks tot geen verliezen en hoeven we geen materiaal te lozen. Alle restbeton en wapening wordt weer gebruikt bij de productie van stapelbare betonblokken. Dit bespaard geld voor het storten van afval en levert geld op bij de verkoop. Als je in het kader van duurzaamheid kijkt is dat ook een grote vooruitgang.
- 
- *Houden jullie zelf rekening met duurzaamheid?*
Onze producten zijn gecertificeerd volgens de ISO:14001 waardoor onze producten een “groene” stempel krijgen. Dat is echter een wettelijk verplicht onderdeel. Bij ontwerpen houden wij niet specifiek rekening met duurzaamheid. Wel proberen we constructies te optimaliseren waardoor er vanzelf minder materiaalgebruik is. Echter zijn deze beslissingen kosten gestuurd. Wel hebben dergelijke beslissingen vaak onbewust een goede invloed op de duurzaamheid van je product omdat er minder materiaal nodig is. Tot slot proberen we zoveel mogelijk bekisting her te gebruiken.
 - *Hoe denk je dat het kan dat er nog relatief weinig aandacht aan duurzaamheid van constructies besteed wordt?*
Duurzaamheid en duurzame ontwikkelingen kosten in de eerste fase geld. Zolang er niet fors geïnvesteerd wordt in de zoektocht naar nieuwe of vervangende materialen is het voor leveranciers te moeilijk om duurzame producten te leveren. Zelf het onderzoek uitvoeren is te duur en een opdrachtgever heeft er vaak niet genoeg geld voor over om een product duurzamer te maken.
 - *Maken jullie wel eens gebruik van 90 dagen sterkte van beton?*
Nee, dat is in de praktijk bijna niet haalbaar doordat we nooit precies weten wanneer het product geleverd moet worden.
 - *Hoe zit het met CO₂ uitstoot ten opzichte van in het werk gestort beton?*
Personeel hoeft niet door het hele land te reizen om de bouwplaats te bereiken. De processen gaan sneller waardoor minder arbeid benodigd is. Arbeid zorgt indirect ook voor extra uitstoot van CO₂, doordat er minder gereisd wordt.
 - *Maakt transport van elementen de constructie meer of minder duurzaam?*
Dat is zeer afhankelijk van waar de materialen vandaan komen. Wij mogen materialen enkel inkopen binnen een bepaalde regio. Daarentegen mogen we onze producten dan wel weer verkopen door het gehele land. Dat maakt de vergelijking erg scheef en slecht te controleren. Daarnaast is het afhankelijk van hoe de vorm

van de elementen in relatie staat tot de vrachtwagens. Indien een vrachtwagen goed volgeladen kan worden, hoeven we veel minder vaak te rijden dan bij onpraktische vormen.

- *Zien jullie in de toekomst mogelijkheden tot verduurzaming? En zijn die mogelijkheden voor prefab anders dan bij in het werk gestort beton?*
De grootste slag zit met name bij het produceren en reduceren van cement. Zolang daar geen vervangend product voor is, zijn veel van de oplossingen gerommeld in de marge. Het is nauwelijks mogelijk om met de bestaande voorzieningen sterk te verduurzamen. Dat geldt voor zowel de prefab als de in het werk gestorte betonconstructies.
- *Worden er wel eens eisen gesteld aan een maximale CO2 emissie bijvoorbeeld?*
Dat hebben wij nog niet meegemaakt.
- *Hoeveel is de CO2 uitstoot van beton en wapening?*
Van zulke cijfers zijn wij niet op de hoogte. Ik geloof dat een kubieke meter beton zo'n 350 tot 400kg CO2 uitstoot heeft.
- *Zie jij mogelijkheden in circulair bouwen? Ook afhankelijk van de tijd waarin je een gebouw nodig hebt en er toevallig 1 beschikbaar is.*
Het gebeurt wel veel, maar wij doen er nog niks mee. De toepassing waarbij ik het zie is het vooral bij hout- en staalconstructies. Bij prefab is het lastiger. Dan ga je naar modulair bouwen en dat lijkt voorlopig een zeer specialistisch vakgebied. Je bent daarbij ook zeer afhankelijk van de ontwerpende partij en wensen van de opdrachtgever. Doordat gebouwen vaak verschillend zijn is het lastig om een afzetgebied te creëren. Denk hierbij ook aan bijvoorbeeld een stuclaag, deze wordt vaak aan 1 zijde van de wand of kolom gemaakt. Hoe komt dit dan over in een nieuw gebouw?

Integraal ontwerpen en uitvoerbaarheid

- *Bij welke fase van het project worden jullie betrokken? Is dat voor alle projecten hetzelfde?*
Op dit moment is dat nog zeer verschillend maar we merken langzaam dat we steeds vroeger in het proces mee mogen denken. Dit biedt veel voordelen omdat men elkaar ook beter begrijpt op het moment dat we naar de uitvoering gaan. De achtergrond van keuzes is dan bekend en vormt begrip bij verschillende partijen.
- *Wat zou deze rol in jou ideaal beeld moeten zijn?*
Idealiter zitten wij bij het ontwerp aan tafel. Dan kunnen wij sturen op economische, efficiënte beslissingen waardoor er een duidelijke win-win situatie te creëren is. Optimaliseren werkt samen met elke facet van het proces. Dat geldt tevens voor onze constructeur in relatie tot de hoofdconstructeur.
- *Is de elementgrootte door de vrachtwagens in jou optiek een beperking?*
Dat is zeker een beperking, zeker gelet op de samenhang van de constructie. Aanrijroutes zijn tevens bepalend voor de grootte van de elementen. Viaducten en smalle bochten kunnen bepalend zijn voor de keuze grote van de elementen. Rechttop kunnen we maximaal 4 meter hoogte plaatsen. Als we schuine elementen plaatsen kan dit worden opgehoogd tot 4,6 meter. Echter is de hoeveelheid elementen welke op een vrachtwagen kunnen dan zeer beperkt. De maximale lengte is 12 meter waarbij gereden wordt met een open deur aan de achterkant.

Kosten

- *Op welk type projecten liggen de grootste voor- en nadelen van prefab?*

Hierin ben je zeer afhankelijk van het ontwerp. Hoe vrijer de vorm en met hoe meer afwijkingen, hoe lastiger het voor ons wordt. Zijn er bijvoorbeeld stabiliteitskernen of zijn alle elementen uitkragend? Een constructeur en een architect bepalen zulke randvoorwaarden. Vervolgens komt er een aannemer aan tafel welke hier ook weer eigen idee bij heeft. Hij is vaak leidend in de te kiezen bouwsystematiek. Waar Trebbe bijvoorbeeld appartementengebouwen tot 8 á 9 lagen in kalkzandsteen maakt, zal de BAM nagenoeg altijd kiezen voor prefab. Dat is puur omdat hun werksystematiek daar volledig op is afgestemd.

- *Hoe verhouden de kosten zich tot in het werk gestort beton?*
Dat is zeer lastig vast te stellen omdat je hierin zeer afhankelijk van de aannemer. Als een aannemer bijvoorbeeld een, financieel, reeds afgeschreven tunnelbekisting heeft, kan dat een zeer goedkope uitvoeringsmethodiek zijn. Hetzelfde geldt voor alle typen bekistingen in de uitvoering maar ook voor ons. Indien er speciale mallen gemaakt moeten worden voor één-malig gebruik, is dat erg kostbaar. Als er repetitie in het project aanwezig is, worden we snel goedkoper. De grootste winst zit voor prefab vooral in het sneller bouwen en dus reduceren van de bouwtijd. Panden kunnen sneller in gebruik worden genomen en leveren dan geld op. Indirect zorgt een prefabconstructie dus ook voor het terugverdienen van geld.
- *Hoe duur zijn afwijkingen in vorm of bijvoorbeeld sparingen? Kan je dat aangeven in percentages?*
Dat is per project en afwijking zeer verschillend. Afhankelijk van de order en de mogelijkheid tot hergebruiken van de kist. Hierbij geldt wederom dat repetitie de sleutel is tot een goedkoper product. Elke afwijking kost extra werk en dus extra geld. Dat werkt door in het hele proces van engineering tot productie. Dat is de reden voor alle extra kosten. Een wijziging van 5mm is net zo duur als een wijziging van 500mm.
- *Heeft variëren in betonkwaliteit voor verschillende producten met het oog op kosten invloed?*
Wij produceren standaard in C50/60. Het variëren is wel mogelijk maar dat neemt enorm veel risico's met zich mee indien dit niet geautomatiseerd is. Er zullen zeker elementen zijn waarbij een hoge sterkte niet benodigd is en er dus minder cement toegepast wordt. Deze afwijkingen zijn voor het proces zeer ingrijpend en moeilijk te controleren. Het zijn dan afwijkende elementen waar dus extra kosten aan zitten. Een opdrachtgever is zeer zelden bereid daarvoor te betalen. Met name voor het ontkisten is een hoge kwaliteit benodigd om het ontkisten zo vroeg mogelijk te kunnen doen en het productieproces zijn voortgang kan hebben.
- *Wanneer is prefab écht geen geschikte toepassing?*
Er zijn genoeg projecten waarbij wij absoluut geen enkel voordeel kunnen bieden maar om specifieke voorbeelden te geven is lastig. We zijn zeer afhankelijk van de opzet van het gebouw. Hoe is de vorm, waar zitten de gaten, wat zijn de wensen van de architect? enzovoort. Wel is het vaak zo dat we met hele hoge gebouwen vaak zeggen dat de onderste verdiepingen beter in het werk gestort kunnen worden. Daar is de aansluiting in prefab vaak te lastig te maken omdat er geen natte knopen aanwezig zijn. Hierbij zijn we ook beperkt door de afmetingen van de vrachtwagens.
- *Jullie uitwerking, zit dat in de prijs van de elementen?*
Ja dat is onderdeel van ons product. Bij het maken van een raming/begroting houden wij zelf rekening met de kosten van onze engineering. Daar hebben wij vaste constructeurs voor waardoor we de prijzen relatief laag kunnen houden.

Interview met Lonneke van Haalen, duurzaamheidsspecialist en constructeur bij ABT Velp

Constructeur en duurzame ontwerpen algemeen

- *Welke rol speelt duurzaamheid in jou ogen bij constructies?*
Duurzaamheid is een zeer onderbelicht onderdeel bij het ontwerpen van constructies. Dit terwijl een groot deel van de milieu-impact van het materiaalgebruik van de constructie ongeveer 60% van de totale impact is.
- *Is het voor constructies niet relevant of krijgt het te weinig erkenning?*
Als je het materiaalgebruik uitzet over de gehele levensduur van het gebouw en dat afzet tegen de milieu-impact van het gebruik van het gebouw over de gehele levensduur is de impact van de materialen zeer beperkt. In 2014 publiceerde bouwen met staal een onderzoek waaruit bleek dat slechts 1.5% uit de materialen komt. In die zin kan je dus stellen dat materialen terecht weinig erkenning krijgen.
 - o *Maar?*
Met het veranderen van eisen en normen van bijvoorbeeld de EPC berekening en BENG voorschriften, zie je dat materiaal in de tijd een steeds groter aandeel heeft. Bij een EPC eis van 0, is materiaal zelfs voor 100% verantwoordelijk voor de emissie van het gebouw.
- *In welke mate komt duurzaamheid in jou dagelijkse werkzaamheden naar voren?*
Nog erg weinig, er is hier een grote stap te zetten. We hebben een enkele projectleider welke duurzaamheid in constructies naar voren laat komen maar ook hij wordt vaak gestuurd door de werkwijze van een aannemer en wensen van een opdrachtgever. Als een opdrachtgever niet geïnteresseerd is, is het erg moeilijk om andere partijen te overtuigen. Ook collega's welke, met name de oudere collega's, zijn slecht in staat zich aan te passen aan deze nieuwe ontwikkelingen. Geld blijft voor iedereen de belangrijkste drijfveer.
- *In welke fase van het ontwerp zou duurzaamheid een rol moeten spelen?*
Het beste is om in de ontwerpfase direct duurzaamheid als één van de uitgangspunten te hebben. De vraag is net hoeveel er aan deze parameter gedraaid mag worden. Een integrale benadering van een duurzaam gebouw is uiteindelijk de beste benadering.
 - o *Hoe zie je dat voor je?*
Om alles puur constructief onder de streep het meest duurzaam te maken is onmogelijk. Je bent zeer afhankelijk van andere partijen. Een voorbeeld hiervan is betonkernactivering. De meest duurzame vloer is een kanaalplaat, hierin is betonkernactivering niet mogelijk. In een klimaatvloer wel, maar deze is minder duurzaam maar door de betonkernactivering heb je wel een duurzamer gebouw. Je bent dus ook erg afhankelijk van hoe andere partijen denken over het oplossen van de integrale problemen. Een integrale aanpak blijft dus van belang.
 - o *Moet een constructeur er veel van af weten of moet er een specialist duurzaamheid bij betrokken worden?*
In de toekomst moet dit gewoon een aspect zijn waarvan een constructeur kennis heeft. Ik praat dan over zijn eigen vakgebied, de impact van de materialen welke hoe toepast. Dit is gewoon een parameter als alle andere, kosten, uitvoerbaarheid enz.
- *Ben je hierbij afhankelijk van een opdrachtgever?*
Voor een groot deel wel, maar dat betekent niet dat wanneer er geen eis is, je hier niks aan kan doen. Een duurzame constructie is vaak ook een lichte constructie waardoor deze ook zeker een lager of in ieder geval gelijkwaardige kostenplaatje kan geven. Ook voor de opdrachtgever kan je het dus interessant maken.
- *Hoe kijk jij aan tegen circulair bouwen?*

Ik weet niet goed of het een hype, trend of toekomst is. Het circulair bouwen zoals het nu gepresenteerd wordt waarin een constructie demontabel is welke vervolgens op een andere plaats kan worden neergezet heb ik mijn twijfels bij. Het demontabele gedeelte is in mijn optiek enkel goed voor het makkelijk recycleren van producten.

Aanbestedingen

- *Wat zijn doorgaans de parameters bij aanbesteding? In welke verhouding komt duurzaamheid en constructiekosten aan bod?*
Dit komt voor constructies nauwelijks specifiek aan bod. Wij hebben vaak integrale ontwerp opdrachten waardoor het gehele gebouw duurzaam moet zijn, maar specifiek voor constructies is er nooit een eis. In overleg met onze andere afdelingen proberen we dan toch een duurzaam gebouw te genereren.
- *Worden er wel eens eisen gesteld aan een maximale CO2 emissie?*
Zelden. Wij hebben één project gehad van het Saxion in Enschede waarbij de opdrachtgever een duurzaam project wilde realiseren, los van alle labels zoals deze nu op de markt zijn. De opdrachtgever heeft hier een keuze gemaakt om milieubewust te werk te gaan zonder vast te zitten aan regels. Door deze vrije opgave hebben wij verschillende varianten voorgesteld met de daarbij behorende impact op het milieu. In samenspraak zijn we zo tot een duurzaam, economisch en vooral flexibel ontwerp gekomen.
- *Winnen jullie wel eens een aanbesteding op basis van duurzaamheid?*
Alleen bij integrale projecten, nooit enkel op constructief gebied. Dat laatste is ook niet iets waarop wij ons in de markt zetten waardoor het niet uitgesloten is dat dergelijke projecten bestaan.

Labels

- *Welke labels gebruiken jullie voor het toetsen van een duurzame constructie?*
Er is ondertussen een wildgroei ontstaan aan keurmerken. Geen van deze onderdelen doet daadwerkelijk recht aan constructies op zich. Er zijn natuurlijk ook hele andere aspecten van belang, zoals bijvoorbeeld het aanwezig zijn van een bushalte in de buurt van een project (BREEAM) maar daardoor sneeuwt de constructie onder. Wij gebruiken dus geen specifieke labels.
- *Moeten we ons blind staren op tools/waarderingen of moeten we zelf een weg inslaan?*
Het is vooral van belang dat je een constructie op meerdere aspecten beoordeelt, waarvan duurzaamheid een steeds meer belangrijke parameter is. Wij, ABT, maken geen gebruik van labels en zijn ons er bewust van dat we daarom niet aan bepaalde certificering kunnen voldoen. Daarvoor moet gebruik gemaakt worden van een andere materialen database waar wij weinig vertrouwen hebben. Wij toetsen onze ontwerpen op onze eigen gestelde randvoorwaarden en eisen waarbij wij het gevoel hebben dat deze op dit moment het dichtst bij de werkelijkheid zitten.

Materialen en producten

Niet traditioneel

- *Passen jullie vaak andere materialen toe in het kader van duurzaamheid?*
Mijn duurzame projecten en studies gaan vooral uit naar de traditionele materialen staal, beton en hout. Alternatieve materialen zijn vaak lastig te vergelijken omdat de normen ontbreken
- *Hout is erg gunstig toch?*
Ja eigenlijk is recent pas uitvoerig onderzoek naar houtconstructies gedaan. Daardoor is er meer informatie beschikbaar gekomen. Hout heeft lange tijd geteerd op de goede naam maar het is inmiddels bekend dat gelamineerd hout een stuk

minder duurzaam is dan gezaagd hout. Gezaagd hout zou zelfs juist een positieve impact hebben op het milieu. Bij het toepassen van meer hout wordt je gebouw dus beter in het kader van milieuprestatie. Dat is wel een beetje tegenstrijdig.

- *Weet jij meer over de kanaalplaat zonder cement?*

Ja, hierbij is het cement vervangen voor geopolymeren. Bij de nieuwbouw van Sensata Technologies Holland in Hengelo is deze vloer enkel toegepast maar als dakvloer. Hierbij is discussie ontstaan met betrekking tot normen en veiligheid omdat het de vraag is of deze vloer nog wel in de betonnorm past. Volgens VBI voldeed deze vloer aan alle eisen met betrekking tot de betonnorm alleen is het dus formeel gezien geen beton.

- o *Was deze vloer veel duurder?*

Ja, met name omdat het productieproces van VBI hier niet op is afgestemd. Het materiaal wordt normaliter niet aangeleverd in poedervorm waardoor de normale cementtoevoer niet zondermeer gebruikt kon worden. Om deze reden is de vloer, ik weet het niet exact, vele malen duurder geworden dan een normale kanaalplaatvloer.

Beton

- *Wat als we de 90 dagen druksterkte gebruiken voor de eindfase? Zit daar winst?*

Hier hebben wij in het verleden onderzoek naar gedaan, met name onze civiele techniek afdeling. Zij kwamen tot de conclusie dat het nauwelijks invloed had maar wel meer werk met zich meebracht. Ik geloof ook dat de veiligheidsfactor anders is waardoor het niet veel invloed heeft op de rekenwaarde van de sterkte.

- *Wat zijn qua duurzaamheid de verschillen tussen ihwg en prefab beton?*

In het werk gestort beton wordt met veel meer hoogovencement gemaakt. Dit terwijl bij de productie van prefab bijna enkel gebruik wordt gemaakt van portlandcement, wat volgens mij een factor 3 meer CO₂ emissie heeft.

- *Prefab, ihwg of holle wand?*

Voor de schillen van holle wanden geldt hetzelfde als voor prefab wanden. Deze worden geprefabriceerd waardoor meer portlandcement wordt gebruikt. Het in het werk gestorte deel kan hierbij wel van beton met hoogovencement worden gemaakt. Deze variant is daardoor ook iets goedkoper dan een prefab element waardoor je zou kunnen stellen dat holle wanden het beste van 2 werelden heeft.

- *Wat is het verschil tussen de ABT ontwerptool groen beton, anders dan CUR ontwerptool?*

De ABT ontwerptool is compacter en meer behapbaar. Voor de tool van CUR moet je bijna betontechnoloog zijn om deze te kunnen gebruiken.

- *Wat zijn duurzame wapeningsverhoudingen?*

Daar hebben wij geen onderzoek naar gedaan. Wij gebruiken voor onze ontwerpen standaard verhoudingen.

- *Ontwerpen jullie ook op duurzaamheid wapening in relatie tot betonvorm?*

Nee nog niet, omdat de kennis ontbreekt.

Staal

- *Welke staalkwaliteit passen jullie doorgaans toe?*

Meestal ontwerpen wij alles in S355 tenzij doorbuiging ruim maatgevend is, dan willen wij ook nog wel eens S235 toepassen. S460 wordt eigenlijk nooit gebruikt.

- *Ik heb eens geleerd dat S460 meest duurzaam is doordat deze bij HE-profielen door minder walsen minder energie gebruiken. Kan jij dat bevestigen?*

Dat heb ik nog niet eerder gehoord en daar heb ik ook geen documentatie van.

- *Heb je voor staal ook veel achtergrond documentatie?*

Nee, bij staal is het veel makkelijkere beschikbaar en zijn de parameters wat betreft duurzaamheid zeer beperkt. De emissie en schaduwprijs van alle sterkteklassen is gelijk.

Achtergrond info en ontwerptools

- *Op welke wijze gebruiken jullie hierbij de Revit tool? Rekenen jullie hele varianten door?*
Nee, na enige analyse van gebouwen herken je al snel patronen waardoor het niet nodig is hele varianten uit te werken. Vaste dingen zijn bijvoorbeeld: compact bouwen en korte buigende elementen.
- *Hoe wordt er bij staalconstructies rekening gehouden met brandwerende bekleding? Dat is ook een product met CO2 uitstoot.*
Dit is voor ons lastig te achterhalen waardoor wij deze parameter niet kunnen invoeren en gebruiken. Het gebruik van de tool is daarom niet altijd geschikt als ontwerpvergelijking maar meer als beste inschatting van de uiteindelijke fase.
- *Gebruiken jullie meer de schaduwprijs of CO2 emissie van een constructie?*
Sinds enkele jaren zijn wij bezig met duurzaamheid. In het begin was emissie hierbij de belangrijkste en eigenlijk enige schakel. Met de komst van nieuwe richtlijnen en schaduw prijzen gestuurd door de overheid, wordt dit een belangrijker onderdeel.
- *Hoe gaan jullie om met de milieu-impact van bouwkundige wanden in?*
Deze nemen wij niet mee, dat is een bouwkundig onderdeel.

Referentieprojecten

TNT Green Office Hoofddorp (Hoge Greencalc+ score)

Algemene informatie

Opdrachtgever:	Triodos / OVG
Architect:	Architectenbureau Paul de Ruiter
Constructeur:	van Rossum
Aannemer:	Boele en van Eesteren
Gebruiksfuncties:	Kantoor
Nieuwbouw/verbouw:	Nieuwbouw
Ontwerpfilosofie:	Multidisciplinair en integraal



Constructie

Wat is de gekozen bouwsystematiek?

De constructie is, vanuit het oogpunt van bouwkosten en bouwtijd, volledig uitgevoerd in prefabbeton. Het is opgebouwd uit balken en kolommen met daarop kanaalplaatvloeren met een overspanning van 16.2 meter. Het mos-dak met zonnecellen wordt ondersteund door grote gelamineerde houten liggers welke ook 16.2 meter overspannen. De liftschachten fungeren als stabiliteitselementen.

Op welke wijze is de stabiliteit gerealiseerd?

De stabiliteit wordt voorzien vanuit de lift- en leiding schachten welke op verschillende posities in het gebouw zijn geplaatst. Deze prefab wanden zijn de enige gesloten elementen in het gehele gebouw.

Constructieve bijzonderheden

Bij het ontwerp is uitgegaan van een hogere veranderlijke belasting om de constructie toekomstbestendig te maken. Door de hogere veranderlijke belasting kan er gemakkelijk voor een functiewijziging of andere indeling van het gebouw gekozen worden.

Duurzaamheid

Constructieve duurzaamheidsaspecten

Er is zoveel mogelijk gebruik gemaakt van recyclebare materialen. De fundering is voor 70% gerealiseerd uit recyclebare materialen, met name door het toepassen van betongranulaat. Voor het gehele gebouw geldt dat ruim 20% van de materialen geproduceerd is uit gerecycled producten. Hierdoor wordt de CO₂ emissie verminderd en is het gebruik van fossiele brandstoffen tot een minimum beperkt. Alle materialen zijn binnen een straal van 500mijl rondom het gebouw geproduceerd waarvan 40% in de categorie, regionaal valt.

Overige duurzaamheidsaspecten

- 100% duurzame energie
- Groen/mos dak met zonnepanelen
- Grootste impact milieu labels:
 - o Duurzame warmte-en koude lucht toevoer en opslag 69%
 - o Energieverbruik sterk omlaag 64%
 - o Watergebruik 75% minder
- Trappen gepositioneerd in het midden van het atrium. Liften in de hoeken van het gebouw waardoor trapgebruik gestimuleerd word.

Geelen Counterflow kantoorgebouw (hoogste BREEAM score)

Algemene informatie

Opdrachtgever:	Getec BV en Geelen Counterflow
Architect:	Architecten en Bouwmeesters (Herten-Roermond)
Constructeur:	Adviesbureau Lüning
Aannemer:	In eigen beheer gerealiseerd, gecoördineerd door bouwmanager
Gebruiksfuncties:	Kantoor
Nieuwbouw/verbouw:	Nieuwbouw
Ontwerpfilosofie:	Integraal, BREEAM gestuurd



Constructie

Wat is de gekozen bouwsystematiek?

De constructie is opgebouwd uit houten kolommen en liggers. De liggers steunen vervolgens de houten vloerelementen. Voor het dak en voor de verdiepingsvloer is gebruik gemaakt van dezelfde houten vloer elementen, met een afwijkende afwerking.

De vloeren zijn samengesteld door NUR-HOLZ. NUR-HOLZ heeft voorlopig als enige op de wereld een systeem ontwikkeld waarbij geen lijm nodig is. Deze vloeren zijn opgebouwd uit verschillende platen welke verbonden zijn door midden van beukenhouten schroeven. Deze schroeven zwellen op wanneer ze geschroefd worden in een paneel omdat ze restvocht opnemen uit het overige hout. De verbinding is daardoor 100% schuifvast.



Onder het gebouw bevindt zich een kelder welke is uitgevoerd in beton. De wanden zijn deels geprefabriceerd doordat er gebruik gemaakt is van een holle wand systemen.

Op welke wijze is de stabiliteit gerealiseerd?

Evenals de vloeren worden de wand elementen van NUR-HOLZ samengesteld uit verschillende houtplaten. De wanden zijn opgebouwd uit een kern van 6 tot 8 cm waartegen meerder lagen hout geplaatst kunnen worden. De gewenste wanddikte kan worden opgevoerd worden tot maximaal 35cm. Ter plaatse van leidingschachten en de trappen zijn wandelementen geplaatst welke door hun schijfwerking de stabiliteit van het gebouw realiseren.

Constructieve bijzonderheden

Het gebouw is volledig gerealiseerd in lijm-vrij hout. Dat is, gelet op de CO₂ emissie het meest duurzame materiaal dat kan worden toegepast.

Duurzaamheid

Constructieve duurzaamheidsaspecten

De bouwmaterialen zijn zoveel mogelijk “Cradle to Cradle” gecertificeerd. Alle hout elementen welke zijn toegepast zijn volledig gerealiseerd uit FSC/PEFC gecertificeerd hout. Het betreft naaldhout uit duurzaam beheerde bos, het Zwarte Woud. De holle wanden en vloerconstructie van de kelder is geproduceerd met 100% gerecycled betongranulaat.

Overige duurzaamheidsaspecten

- Wekt middels zonnecellen 50% meer energie op dan dat wordt verbruikt. Het overschot wordt geleverd aan een naastgelegen fabriek.
- Alle gevel elementen en kozijnen zijn ook in hout gerealiseerd.
- Herbruikbaarheid bij afschrijving van het gebouw was een speerpunt bij het ontwerp
- Er wordt voor de verwarming en verkoeling van het gebouw gebruik gemaakt van een compressie warmtepompsysteem.
- Het water wordt zoveel mogelijk verwarmd door de warmte uit zonne collectoren.
- Voor het doorspoelen van het toilet wordt gebruik gemaakt van regenwater dat is opgevangen op het dak.

Watertoren Bussum (zeer hoge Greencalc+ score)

Algemene informatie

Opdrachtgever:	Bussum's watertoren collectief
Architect:	Vocus Architecten
Constructeur:	
Aannemer:	
Gebruiksfuncties:	Kantoor
Nieuwbouw/verbouw:	Verbouw
Ontwerpfilosofie:	Duurzaamheid gestuurd in een integraal ontwerpteam

Het gebouw betreft een watertoren uit de jaren 1897 welke is verbouwd in de jaren 2008 tot en met 2010. Aansluitend is er een duurzaam kantoor pand naast de watertoren gerealiseerd. De aandacht voor deze referentie studie gaat echter vooral uit naar de watertoren zelf.

Constructie

Wat is de gekozen bouwsystematiek?

Indertijd het duurzaamste kantoorgebouw van Nederland. Het principe van de constructie is als bij vele andere watertorens, een taps toelopende schacht van metselwerk. Op de verdiepingen bevinden zich houten vloeren ondersteund door een staalconstructie. De extra verdiepingsvloeren zijn op dezelfde wijze geconstrueerd. In tegenstelling tot de traditionele vloeren is in plaat van hout, bamboe gebruikt.

Op welke wijze is de stabiliteit gerealiseerd?

Door de ronde vorm is de constructie zeer geschikt om windbelasting uit alle richtingen op te nemen maar ook om de wind langs de gevel te leiden geleiden. Doordat het een massieve metselwerk wand betreft is deze zeer stijf voor daar de bovenbelasting hoog is.

Constructieve bijzonderheden

Geen.

Duurzaamheid

Constructieve duurzaamheidsaspecten

Vloeren van Bamboe.

Overige duurzaamheidsaspecten

De inrichting met bamboe vloeren, houten bureaus en stoffen ventilatie kanalen dragen bij aan het duurzaam karakter van de toren.

- Warmte-kracht koppeling waardoor het gebouw verwarmt wordt met gebruikt frituurvet
- Warmte-koude opslag in de bodem
- Windmolen op het dak
- Hergebruik regenwater
- Zonnecellen
- Groenvoorzieningen op het dak



Distributie centrum NewLogic II

Algemene informatie

Opdrachtgever:	Dokvast vastgoed
Architect:	Habeon Architecten
Constructeur:	SAMEN advies en engineering
Aannemer:	Heembouw
Gebruiksfuncties:	Distributiecentrum en kantoor
Nieuwbouw/verbouw:	Nieuwbouw
Ontwerpfilosofie:	Met duurzaamheid als sturende parameter is in een integraal ontwerpteam het ontwerp afgestemd op energiebehoefte en opwekking.



Constructie

Wat is de gekozen bouwsystematiek?

Het gebouw is in zijn geheel ontworpen als staalconstructie met kanaalplaatvloeren. De stramienmaten zijn volledig afgestemd op de huidige gebruiksfuncties, dus stellingenplannen. Tevens zijn er zo min mogelijk kolommen zichtbaar in de hal. De begane grondvloer is een in het werk gestorte vloer welke direct op puingranulaat is gestort. Dit puingranulaat bestaat voor 100% uit gerecycled materiaal. Het puingranulaat in combinatie met grondverbetering dient als fundering voor de gehele constructie. Er is zoveel mogelijk gekozen om granulaat toe te passen omdat dat duurzamer is dan het aanbrengen van een zandpakket. Ter plaatse van de kantoren is op de begane grond gekozen voor een kanaalplaatvloer zodat er de mogelijkheid was tot het creëren van een kruipruimte. Het dak is gemaakt van een stalen dakplaat.



Op welke wijze is de stabiliteit gerealiseerd?

De stabiliteit wordt gehaald uit een combinatie van windverbanden in de bedrijfshallen en lift- en leidingschachten van beton in het kantoor gedeelte.

Constructieve bijzonderheden

Door het constructief ontwerp is er hoge mate van flexibiliteit in gebruik. Dimensies volledig geoptimaliseerd op huidige gebruiksfuncties. De kolommen zijn voorzien van bescherming zodat deze langer meegaan en aanrijdbelasting niet gerekend hoeft te worden.

Duurzaamheid

Constructieve duurzaamheidsaspecten

Er is gekozen voor kanaalplaatvloeren met betongranulaat en de vorm van de staalconstructie is volledig geoptimaliseerd.

Overige duurzaamheidsaspecten

- Specifieke aandacht voor afvalscheiding tijdens de bouw.
- Translucente gevelpanelen om de benodigde verlichting zo minimaal mogelijk te houden.
- Enkel verwarming, geen verkoeling in de hallen
- Alle hout heeft een FSC keurmerk.
- Minimaal water verbruik.

Kantoor- en industrie gebouw Lely Industries

Algemene informatie

Opdrachtgever:	Lely Industries
Architect:	Consort Architects
Constructeur:	IMD Raadgevende ingenieurs
Aannemer:	Dura Vermeer
Gebruiksfuncties:	Kantoor en industrie
Nieuwbouw/verbouw:	Nieuwbouw
Ontwerpfilosofie:	Integraal ontwerp



Constructie

Wat is de gekozen bouwsystematiek?

Het gebouw is opgebouwd uit een staalconstructie van veelal vakwerken. De vakwerken variëren in hoogte van 1 tot 3 verdiepingen wat grote overspanningen mogelijk maakt. De verdiepingen hebben ongeveer variabele hoogte van 3.4 en 3.7 meter. Op de staalconstructie liggen kanaalplaatvloeren welke variëren met een overspanning van 14.4 tot 21.6m. De kanaalplaten zijn voorzien van een druklaag. De gehele staalconstructie rust op prefab betonkolommen. De fundering is samengesteld uit balken en poeren gesteund door prefab heipalen.

Op welke wijze is de stabiliteit gerealiseerd?

De stabiliteit van de constructie wordt gewaarborgd door het samenstel van 3 kernen en de prefab betonkolommen.

Constructieve bijzonderheden

Bij het ontwerp van de dakconstructie is rekening gehouden met eventueel te plaatsen windmolens op het dak. Dat heeft veel invloed op de te rekenen belasting. De afmetingen en belastingen van de eventueel toekomstige windmolens zijn onbekend.

Verder is op het dak ruimte gemaakt voor 580 parkeerplaatsen. De resterende ruimte op het dak is bestemd als groenvoorziening.

Duurzaamheid

Constructieve duurzaamheidsaspecten

Door de dragende vakwerken in de gevels en kanaalplaatvloeren met extra berekende belasting is bijna elke indeling mogelijk in geval van herbestemming van het gebouw.

Overige duurzaamheidsaspecten

- Warmte en koude opslag in bodem
- Zonnecollectoren
- Hergebruik regenwater
- CO₂ neutraal
- Groenvoorzieningen op het dak

Bijlage E: Achtergrond kosten

Constructies algemeen

Staalconstructies

Standaardprofielen

281112 101 stalen profiel ipe 80-220	€ 1263.50 ton ▼
281112 102 stalen profiel ipe 240-330	€ 1273.00 ton ▼
281112 103 stalen profiel ipe 360-400	€ 1292.00 ton ▼
281112 104 stalen profiel ipe 450-500	€ 1311.00 ton ▼
281112 105 stalen profiel ipe 550-600	€ 1363.25 ton ▼
281112 401 stalen profiel he 100-180a	€ 1263.50 ton ▼
281112 402 stalen profiel he 200-220a	€ 1287.25 ton ▼
281112 403 stalen profiel he 240-320a	€ 1306.25 ton ▼
281112 404 stalen profiel he 340-400a	€ 1330.00 ton ▼
281112 405 stalen profiel he 450-650a	€ 1391.75 ton ▼
281112 406 stalen profiel he 700-1000a	€ 1434.50 ton ▼
281112 501 stalen profiel he 100-180b	€ 1263.50 ton ▼
281112 502 stalen profiel he 200-220b	€ 1282.50 ton ▼
281112 503 stalen profiel he 240-320b	€ 1306.25 ton ▼
281112 504 stalen profiel he 340-400b	€ 1330.00 ton ▼
281112 505 stalen profiel he 450-650b	€ 1391.75 ton ▼
281112 506 stalen profiel he 700-1000b	€ 1434.50 ton ▼

PLAATMATERIAAL, BRANDWEREND

TABEL	OMSCHRIJVING	CONDITIES	TOELICHTING
-------	--------------	-----------	-------------

Tabel

Dikte in mm	Prijs per m²
8	18,50
10	23,50
12	28,00
15	34,50
20	46,00
25	58,00

OMTIMMEREN STALEN LIGGER

TABEL	OMSCHRIJVING	CONDITIES	TOELICHTING
-------	--------------	-----------	-------------

[Reageer op](#)

Tabel

Profiel	Profielnummer	Kosten per m					
		Omtimmerd met multiplex, plaatdikte			Omtimmerd met brandwerend materiaal, plaatdikte		
		12 mm	15 mm	18 mm	12 mm	15 mm	20 mm
HEA / HEB	100	23.60	24.45	29.35	28.15	30.10	33.55
	120	25.95	26.95	32.85	31.40	33.75	37.90
	140	28.35	29.50	36.35	34.65	37.40	42.20
	160	30.70	32.00	39.85	37.90	41.05	46.55
	180	33.05	34.50	43.35	41.20	44.70	50.90
	200	35.40	37.05	46.85	44.45	48.35	55.25
	220	37.75	39.55	50.35	47.70	52.00	59.60
	240	40.10	42.10	53.85	50.95	55.65	63.90
	260	42.45	44.60	57.35	54.25	59.30	68.25

AANBRENGEN STAALCONSTRUCTIE, KOLOMMEN

TABEL	CONDITIES	AFBEELDINGEN	TOELICHTING
-------	-----------	--------------	-------------

[Reageer op de](#)

Tabel

Uitvoering	Kolomtype Profiel	Nummer	Kosten per kg			
			Tot 2.000 kg	2.000 - 5.000 kg	5.000 - 10.000 kg	Vanaf 10.000 kg
Gestraald en 1x gemenied	INP	80 - 220	1.81	1.77	1.73	1.63
	UNP en IPE	80 - 220	1.81	1.72	1.64	1.57
	HE-A en B	100 - 180	1.78	1.75	1.62	1.55
		200 - 300	1.75	1.70	1.62	1.56
Gestraald en 1x gemenied in kleur	INP	80 - 220	1.67	1.63	1.55	1.42
	UNP en IPE	80 - 220	1.64	1.55	1.39	1.31
	HE-A en B	100 - 180	1.59	1.52	1.44	1.36
		200 - 300	1.57	1.52	1.44	1.36
Thermisch verzinkt	INP	80 - 220	2.05	2.01	1.95	1.87
	UNP en IPE	80 - 220	1.93	1.93	1.84	1.77
	HE-A en B	100 - 180	2.00	1.93	1.84	1.60
		200 - 300	1.97	1.95	1.83	1.76

Prefab Kolommen

281121 301 kolom ø160mm, hoogte 3000mm schoonwerk	€	331.16 st	▼
281121 302 kolom ø180mm, hoogte 3000mm schoonwerk	€	345.86 st	▼
281121 303 kolom ø200mm, hoogte 3000mm schoonwerk	€	364.48 st	▼
281121 304 kolom ø220mm, hoogte 3000mm schoonwerk	€	391.92 st	▼
281121 305 kolom ø230mm, hoogte 3000mm schoonwerk	€	398.78 st	▼
281121 306 kolom ø240mm, hoogte 3000mm schoonwerk	€	411.52 st	▼
281121 307 kolom ø250mm, hoogte 3000mm schoonwerk	€	425.24 st	▼
281121 308 kolom ø300mm, hoogte 3000mm schoonwerk	€	497.76 st	▼
281121 309 kolom ø350mm, hoogte 3000mm schoonwerk	€	517.36 st	▼
281121 310 kolom ø400mm, hoogte 3000mm schoonwerk	€	589.88 st	▼

281121 101 kolom []200mm, hoogte 3000mm 4-zijdig schoonwerk	€	398.78 st	▼
281121 102 kolom []230mm, hoogte 3000mm 4-zijdig schoonwerk	€	437.00 st	▼
281121 103 kolom []250mm, hoogte 3000mm 4-zijdig schoonwerk	€	470.32 st	▼
281121 104 kolom []300mm, hoogte 3000mm 4-zijdig schoonwerk	€	557.54 st	▼

In het werk gestort Kolommen Vierkant

281131 101 betonnen kolom []200mm, hoogte 3000mm wapening 90kg/m3, multiplex bekisting	€	252.55 st	▼
281131 102 betonnen kolom []300mm, hoogte 3000mm wapening 90kg/m3, multiplex bekisting	€	322.29 st	▼
281131 103 betonnen kolom []400mm, hoogte 3000mm wapening 90kg/m3, multiplex bekisting	€	442.10 st	▼
281131 104 betonnen kolom []500mm, hoogte 3000mm wapening 90kg/m3, multiplex bekisting	€	575.52 st	▼
281131 105 betonnen kolom []600mm, hoogte 3000mm wapening 90kg/m3, multiplex bekisting	€	726.71 st	▼

281132 1201 betonnen kolom [J200mm wapening 90kg/m3, kartonnen bekisting	€	49.06 m1 ▼
281132 1203 betonnen kolom [J300mm wapening 90kg/m3, kartonnen bekisting	€	72.79 m1 ▼
281132 1205 betonnen kolom [J400mm wapening 90kg/m3, kartonnen bekisting	€	109.47 m1 ▼

Rond

Schoonwerk

281132 1101 betonnen kolom ø200mm wapening 90kg/m3, kartonnen bekisting	€	42.14 m1 ▼
281132 1102 betonnen kolom ø300mm wapening 90kg/m3, kartonnen bekisting	€	59.20 m1 ▼
281132 1103 betonnen kolom ø400mm wapening 90kg/m3, kartonnen bekisting	€	81.78 m1 ▼
281132 1104 betonnen kolom ø600mm wapening 90kg/m3, kartonnen bekisting	€	142.45 m1 ▼

Vuilwerk

281132 1001 betonnen kolom ø202/208mm wapening 90kg/m3, kartonnen bekisting	€	40.04 m1 ▼
281132 1002 betonnen kolom ø300/306mm wapening 90kg/m3, kartonnen bekisting	€	56.22 m1 ▼
281132 1003 betonnen kolom ø400/408mm wapening 90kg/m3, kartonnen bekisting	€	77.93 m1 ▼
281132 1004 betonnen kolom ø600/608mm wapening 90kg/m3, kartonnen bekisting	€	135.80 m1 ▼
281132 1005 betonnen kolom ø800/810mm wapening 90kg/m3, kartonnen bekisting	€	225.04 m1 ▼

Wanden

282111 101 betonnen wand, dikte 150mm, hoogte 2,5m wapening 25kg/m3, systeemwandbekisting	€	177.76 m1 ▼
282111 102 betonnen wand, dikte 200mm, hoogte 2,5m wapening 25kg/m3, systeemwandbekisting	€	203.72 m1 ▼
282111 103 betonnen wand, dikte 250mm, hoogte 2,5m wapening 25kg/m3, systeemwandbekisting	€	231.59 m1 ▼
282111 104 betonnen wand, dikte 300mm, hoogte 2,5m wapening 25kg/m3, systeemwandbekisting	€	261.25 m1 ▼

282112 101 betonnen wand, dikte 150mm, hoogte 2,5m wapening 75kg/m3, traditionele bekisting	€	367.48 m1 ▼
282112 102 betonnen wand, dikte 200mm, hoogte 2,5m wapening 75kg/m3, traditionele bekisting	€	405.42 m1 ▼
282112 103 betonnen wand, dikte 250mm, hoogte 2,5m wapening 75kg/m3, traditionele bekisting	€	446.25 m1 ▼
282112 104 betonnen wand, dikte 300mm, hoogte 2,5m wapening 75kg/m3, traditionele bekisting	€	487.88 m1 ▼

282113 101 hollewandsysteem hoogte 3000mm, dikte 320mm 45kg/m3	€	115.40 m2 ▼
--	---	-------------

282114 101 lichtbeton wandelement, dikte 70mm	€	43.78 m2 ▼
282114 102 lichtbeton wandelement, dikte 100mm	€	46.28 m2 ▼
282114 103 lichtbeton wandelement, dikte 120mm	€	49.28 m2 ▼

Liggers

STORTEN BALK

TABEL	OMSCHRIJVING	CONDITI
-------	--------------	---------

Tabel

Afmeting in mm		Kosten per m
Breedte	Hoogte	
200	300	118.00
	350	133.00
	400	149.00
250	300	129.00
	350	146.00
	400	163.00
300	400	177.00
	500	213.00
	600	249.00
400	500	245.00
	600	285.00

Wanden

Dragend

Cellenbeton

Tabel

Type	Afmeting in mm		Prijs per m ²
	Dikte	Breedte	
G4/600	70	600	14.70
	100	600	21.05
G5/800	100	500	21.30

Omschrijving

Omschrijving

Lengte van 2.400 tot 3.400 mm.

Uitgangspunten

Prijzen franco werk gebaseerd op een transportafstand van 100 km.

Kalkzandsteen

Metselblokken

LIJMEN, BINNENPOUWBLAD, KALKZANDSTEEN, ELEMENTEN

TABEL	OMSCHRIJVING	CONDITIES	AFBEELDINGEN	TOELIC
-------	--------------	-----------	--------------	--------

LIJMEN, BINNENPOUWBLAD, KALKZANDSTEEN, LIJMBLOKKEN

TABEL	OMSCHRIJVING	CONDITIES	AFBEELDINGEN	TOELICHTING
-------	--------------	-----------	--------------	-------------

[Reageer op deze](#)

Tabel

Druksterkte	Type	Wanddikte in mm	Afmeting in mm	Kosten per m ²
CS 12	E 100	100	100 x 538 x 997	41.65
	E 120	120	120 x 538 x 997	41.10
	E 150	150	150 x 538 x 997	49.15
	E 214	214	214 x 538 x 997	64.40
	E 240	240	240 x 538 x 997	65.55
	E 300	300	300 x 538 x 997	75.45
CS 20	E 100	100	100 x 538 x 997	43.20
	E 120	120	120 x 538 x 997	42.90
	E 150	150	150 x 538 x 997	51.40
	E 214	214	214 x 538 x 997	68.90
	E 240	240	240 x 538 x 997	69.15
	E 300	300	300 x 538 x 997	79.90
CS 36	EH 175	175	175 x 538 x 997	69.80
	EH 214	214	214 x 538 x 997	85.20
	EH 250	250	250 x 538 x 997	86.90
	EH 300	300	300 x 538 x 997	103.00

Tabel

Uitvoering	Omschrijving	Type	Wanddikte in mm	Afmeting in mm	Druksterkte	Kosten per m ²	
						Tot 250 m ²	Vanaf 250 m ²
Schoonwerk	V-blokken	V 67/298	67	67 x 298 x 437	CS 12	49.00	47.45
		V 100/198	100	100 x 198 x 437	CS 12	58.50	54.55
					CS 20	63.00	59.00
		V 100/298	100	100 x 298 x 437	CS 12	57.15	54.35
		V 150/148	150	150 x 148 x 297	CS 12	75.75	71.35
					CS 20	82.35	77.95
		V 150/298	150	150 x 298 x 437	CS 12	75.85	71.85
					CS 20	82.65	78.65
		V 214/298	214	214 x 298 x 437	CS 12	97.30	96.55
					CS 20	107.00	106.00
Vuilwerk	L-blokken	L67/298	67	437 x 67 x 298	CS12	44.60	41.00
		L100/198	100	437 x 100 x 198	CS12	52.65	45.85
					CS 20	55.65	48.80
		L120/198	120	437 x 120 x 198	CS12	60.20	53.80
					CS 20	64.10	57.70
		L150/148	150	297 x 150 x 148	CS12	72.95	66.55
					CS 20	77.85	71.45
		L214/098	214	297 x 214 x 98	CS12	99.55	95.95
					CS 20	106.00	103.00
		L300/098	300	300 x 285 x 98	CS 20	138.00	133.00

Omschrijving

Druksterkte 12 en 20 N/mm².

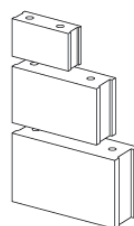
Kwaliteit speciaal voor eenzijdig schoonwerk.

Uitgangspunten

Levering in volle vrachten franco werk.

Verpakte pakketten worden geleverd op statiegeldpallets.

Verpakt groot vanaf 800 kg, verpakt klein tot 800 kg per pallet.



Stenen

Tabel

Type	Afmeting in mm (l x b x h)	Kwaliteit	Prijs per 1.000 stuks		
			Onverpakt	Verpakt groot	Verpakt klein
WF	214 x 102 x 55	CS 16	189,00	221,00	227,00
		CS 16 speciaal		237,00	
AF	214 x 102 x 72	CS 16	246,00	287,00	295,00
		CS 16 speciaal		309,00	
MF	214 x 102 x 82	CS 16	281,00	327,00	338,00
		CS 16 speciaal		351,00	
AFD	214 x 150 x 72	CS 16		522,00	
MFD	214 x 150 x 82	CS 16		593,00	

Omschrijving

Druksterkte 16 N/mm².

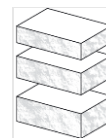
Kwaliteit speciaal voor eenzijdig schoonwerk.

Uitgangspunten

Levering in volle vrachten franco werk.

Verpakte pakketten worden geleverd op statiegeldpallets.

Verpakt groot vanaf 800 kg, verpakt klein tot 800 kg per pallet.



222133 101 kalkzandsteen lijmblok l67/298 [437x67x298mm] vuilwerk	€	45.75 m2 ▼
222133 102 kalkzandsteen lijmblok l100/198 [437x100x198mm] vuilwerk	€	53.11 m2 ▼
222133 105 kalkzandsteen lijmblok l120/198 [297x120x198mm] vuilwerk	€	61.34 m2 ▼
222133 106 kalkzandsteen lijmblok l150/148 [297x150x148mm] vuilwerk	€	75.14 m2 ▼
222133 107 kalkzandsteen lijmblok l150/198 [297x150x198mm] vuilwerk	€	65.53 m2 ▼
222133 108 kalkzandsteen lijmblok l214/148 [297x214x148mm] vuilwerk	€	80.82 m2 ▼

In het werk gestort beton

282111 101 betonnen wand, dikte 150mm, hoogte 2,5m wapening 25kg/m3, systeemwandbekisting	€	177.76 m1 ▼
282111 102 betonnen wand, dikte 200mm, hoogte 2,5m wapening 25kg/m3, systeemwandbekisting	€	203.72 m1 ▼
282111 103 betonnen wand, dikte 250mm, hoogte 2,5m wapening 25kg/m3, systeemwandbekisting	€	231.59 m1 ▼
282111 104 betonnen wand, dikte 300mm, hoogte 2,5m wapening 25kg/m3, systeemwandbekisting	€	261.25 m1 ▼

282112 101 betonnen wand, dikte 150mm, hoogte 2,5m wapening 75kg/m3, traditionele bekisting	€	367.48 m1 ▼
282112 102 betonnen wand, dikte 200mm, hoogte 2,5m wapening 75kg/m3, traditionele bekisting	€	405.42 m1 ▼
282112 103 betonnen wand, dikte 250mm, hoogte 2,5m wapening 75kg/m3, traditionele bekisting	€	446.25 m1 ▼
282112 104 betonnen wand, dikte 300mm, hoogte 2,5m wapening 75kg/m3, traditionele bekisting	€	487.88 m1 ▼

Vlechten wandwapening

Activiteit	Type wapening	Gemiddelde diameter in mm	Klasse	Aantal vlechters	Dagproductie in kg
Vlechten wand	Losse staven	12	Eenvoudig	2	1.500
			Normaal	2	1.000
			Moelijk	2	600
	Netten	10	Normaal	2	1.000

Activiteit	Gemiddelde diameter in mm	Klasse	Aantal vlechters	Dagproductie in kg
Vlechten kelder-/souterrainwand	10	Normaal	4	1.200
		Zwaar	4	960
	12	Normaal	4	1.900
		Zwaar	4	1.200
	16	Normaal	4	2.500
		Zwaar	4	1.900
	20	Zwaar	4	2.000

Storten beton

Activiteit	Stortmethode	Wanddikte in mm	Kubelinhoud in liters	Aantal betonwerkers	Dagproductie in m ³
Beton storten kernwand	Kraan		750	3	18
			1.000	3	20
Beton storten stabilisatiewand	Kraan		750	3	24
			1.000	3	26
Beton storten kelderbuitenwand	Kraan		750	3	28
			1.000	3	30
	Pomp		n.v.t.	5	115
Beton storten woningscheidende wand	Kraan	160	750	3	40
			1.000	3	45
		250	750	3	50
			1.000	3	60

Activiteit	Type bekisting	Aantal timmerlieden	Dagproductie in m ² kistoppervlakte
Bekisten en ontkisten wand	Staal	3	250
	Grootwand hout	3	200

Hollewand systemen

282113 101 hollewandstelsysteem hoogte 3000mm, dikte 320mm 45kg/m ³	€	115.40 m ² ▼
--	---	-------------------------

Complete spouwwallen

212411 13512 spouwwand baksteen-steenwol-kalkzandsteen [rc 4,1] 100-30-130-100mm	€	144.55 m ² ▼
212411 13513 spouwwand baksteen-steenwol-kalkzandsteen [rc 4,3] 100-30-140-100mm	€	145.87 m ² ▼
212411 13531 spouwwand baksteen-hr eps-kalkzandsteen [rc 4,2] 100-30-110-100mm	€	153.75 m ² ▼
212411 13541 spouwwand baksteen-hr pir-kalkzandsteen [rc 3,8] 100-30-100-100mm	€	154.80 m ² ▼
212411 13551 spouwwand baksteen-resol hardschuim-kalkzandsteen [rc 4,2] 100-30-74-100mm	€	156.42 m ² ▼
212411 23511 spouwwand baksteen-steenwol-cellenbeton [rc 4,3] 100-30-120-100mm	€	133.61 m ² ▼
212411 23521 spouwwand baksteen-glaswol-cellenbeton [rc 4,4] 100-30-97-100mm	€	142.72 m ² ▼
212411 23551 spouwwand baksteen-resol hardschuim-cellenbeton [rc 4,2] 100-30-63-100mm	€	149.63 m ² ▼
212411 43511 spouwwand baksteen-steenwol-keramisch metselblok [rc 4,0] 100-30-120-100mm	€	137.12 m ² ▼
212411 43521 spouwwand baksteen-glaswol-keramisch metselblok [rc 4,1] 100-30-97-100mm	€	146.23 m ² ▼
212411 43532 spouwwand baksteen-hr eps-keramisch metselblok [rc 4,2] 100-30-95-100mm	€	150.29 m ² ▼
212411 43541 spouwwand baksteen-hr pir-keramisch metselblok [rc 4,3] 100-30-80-100mm	€	150.17 m ² ▼
212411 43551 spouwwand baksteen-resol hardschuim-keramisch metselblok [rc 3,9] 100-30-63-100mm	€	152.16 m ² ▼
212411 53511 spouwwand baksteen-steenwol-houtskelet [rc 3,6] 100-30-160-25mm	€	158.27 m ² ▼
212411 54521 spouwwand baksteen-steenwol-houtskelet [rc 4,8] 100-30-220-25mm	€	168.96 m ² ▼

Niet dragend

Kalkzandsteen

lijmblokken:

221133 101 kalkzandsteen lijmblok l67/298 [437x67x298mm] binnenwand, vuilwerk	€	36.95 m ² ▼
---	---	------------------------

Niet dragen vellingblokken 2 zijdig schoonwerk

221134 101 kalkzandsteen vellingblok v67/298 [437x67x298mm] binnenwand, 2-zijdig schoonwerk	€	56.05 m ² ▼
---	---	------------------------

Cellenbeton

221141 101 cellenbeton scheidingwand dikte 70mm, paneellengte max. 2790mm	€	28.18 m2 ▼
221141 102 cellenbeton scheidingwand dikte 100mm, paneellengte 2790-2990mm	€	34.58 m2 ▼

Gips

221151 201 gipsblokken 450x500x100mm 180 minuten brandwerend, binnenwand	€	38.46 m2 ▼
221151 202 gipsblokken 450x500x100mm, gehydrofobeerd 180 minuten brandwerend, binnenwand	€	42.51 m2 ▼

Betonsteen gelijmd

221122 102 lichtbeton lijmblok 297x67x298mm vuilwerk	€	31.62 m2 ▼
--	---	------------

Droog gestapeld

221125 101 droog gestapeld betonblok 297x140x150mm	€	39.09 m2 ▼
221125 102 droog gestapeld betonblok/klinker 297x140x150mm	€	41.76 m2 ▼

Woning scheidend

221322 101 woningscheidend isolatiewand gipskartonplaat, dikte 148mm	€	87.97 m2 ▼
221322 102 woningscheidend isolatiewand gipskartonplaat, dikte 200mm	€	103.38 m2 ▼

Gedetailleerde informatie



WONINGSCHIEDENDE WANDELEMENTEN

De isolatiewand wordt op de bouwplaats samengesteld uit twee gipskartonplaten met daartussen een spouw die gevuld is met steenwol. De panelen worden onderling gekoppeld met stalen I-profielen.

Toepassing:

Als woningscheidende wand in renovatieprojecten of bij woningsplitsingen, appartementen, hotelkamers, kantoren, ziekenhuizen, laboratoria, e.d.

Technische gegevens:

- Lengten: 2400/2600/2800/3000/3200/3600mm
- Breedte: 600mm
- Brandwerendheid: 120minuten
- Thermische isolatie: 1,89m2K/W
- Geluidsisolatie (I_{luk}, lab): 3dB
- Geluidsisolatie (R_w): 56dB

<https://www.faay.nl/woningscheidende-wanden/>

IW148

Ruimtebesparende woningscheidingswand (148 mm) met uitstekende geluidswering (56 dB) en zeer hoge brandwering (≥ 120 minuten).

Meer info

IW200/54

Compacte woningscheidingswand bij normale verdiepingshoogte (tot 2600 mm). Biedt de hoogste akoestische isolatie (59 dB) en zeer hoge brandwerendheid (≥ 120 minuten).

Meer info

IW200/70

Compacte woningscheidingswand voor hoge ruimten (vanaf 2600 mm). Biedt de hoogste akoestische isolatie (59 dB) en zeer hoge brandwerendheid (≥ 120 minuten).

Meer info

http://knauf.nl/producten-en-systemen/view_mode=GRID/sub_type=system/waar=Binnen/bouwdeel=Wand
Dik:

Eigenschappen

De woningscheidende wand (W115-3) wand heeft een dubbel, stalen frame met stijlen van 100 mm voor meer comfort. De wandstijlen zijn akoestisch van elkaar ontkoppeld, waardoor een hogere geluidsisolatie ontstaat dan bij wanden met een enkel frame. Per zijde heeft de wand drie lagen gipsplaten. De wand is geschikt als woningscheidende wand met I_{luk} ≥ +5 dB. De brandwerendheid bedraagt 90 minuten.

Dun: Eigenschappen

De lichte woningscheidende wanden (W115) hebben een dubbel, stalen frame. De wandstijlen zijn akoestisch van elkaar ontkoppeld, waardoor een hogere geluidsisolatie ontstaat dan bij wanden met een enkel frame. Afhankelijk van de uitvoering zijn de wanden geschikt als woningscheidende wand met I_{luk} ≥ -5 dB of I_{luk} ≥ 0 dB. De brandwerendheid bedraagt 60 minuten.

Vloeren

Zwevende dekvloer

Bouwkosten | Kies uw werksoort

Kies uw bibliotheek

woningbouw ▼ 4 afwerkingen ▼ 43 vloerafwerkingen ▼ 4321 afwerkingen ▼ 432151 cement gietvloeren ▼ 432151 3 zwevende cement gebonden ve ▼

▼	zandcement dekvloeren; vanaf 300m2	cement gebonden
algemeen	cement gietvloeren	cement gebonden vezelversterkt
afwerkingen ▼	vloercoating	zwevende cement gebonden vezelversterkt ▼
bekledingen	anhydriet gietvloeren	
dorpels	verwarming terreinverharding	
vloerplinten		

Kies uw bouwdeel

432151 301 zwevende vezelversterkte gietvloer, totaal dikte 50mm, afname 150-200m2 incl. steenwol isolatie	€	33.20 m2 ▼			
432151 302 zwevende vezelversterkte gietvloer, totaal dikte 50mm, afname 200-300m2 incl. steenwol isolatie	€	31.25 m2 ▼			
432151 303 zwevende vezelversterkte gietvloer, totaal dikte 50mm, afname 300-400m2 incl. steenwol isolatie	€	29.30 m2 ▼			
432151 304 zwevende vezelversterkte gietvloer, totaal dikte 50mm, afname 400-500m2 incl. steenwol isolatie	€	28.35 m2 ▼			
432151 305 zwevende vezelversterkte gietvloer, totaal dikte 50mm, afname 500-700m2 incl. steenwol isolatie	€	27.70 m2 ▼			
432151 306 zwevende vezelversterkte gietvloer, totaal dikte 50mm, afname 700-900m2 incl. steenwol isolatie	€	26.75 m2 ▲			
 Selecteren	Selectie	Excel	ArchCalc	IBIS	ARJUNAR

Vlakke plaatvloer

282122 101 betonnen vloer, dikte 150mm wapening 85kg/m3, schoonwerk	€	98.04 m2 ▼
282122 102 betonnen vloer, dikte 200mm wapening 85kg/m3, schoonwerk	€	114.93 m2 ▼
282122 103 betonnen vloer, dikte 250mm wapening 85kg/m3, schoonwerk	€	132.98 m2 ▼
282122 104 betonnen vloer, dikte 400mm wapening 85kg/m3, schoonwerk	€	187.08 m2 ▼

282121 101 betonnen vloer, dikte 150mm vuilwerk, wapening 85kg/m3	€	96.14 m2 ▼
282121 102 betonnen vloer, dikte 200mm vuilwerk, wapening 85kg/m3	€	113.03 m2 ▼
282121 103 betonnen vloer, dikte 250mm vuilwerk, wapening 85kg/m3	€	131.08 m2 ▼
282121 104 betonnen vloer, dikte 400mm vuilwerk, wapening 85kg/m3	€	185.18 m2 ▼

Aanbrengen wapening

Activiteit	Type wapening	Gemiddelde diameter in mm	Klasse	Aantal vlechters	Dagproductie in kg	
					Woningbouw	Utiliteitsbouw
Vlechten vloeren	Netten zonder bijlegwapening	Variabel	Eenvoudig	4	2.500	3.000
	Netten met bijlegwapening	Variabel	Eenvoudig	4	2.200	1.750
	Losse wapening	12	Eenvoudig	4	2.500	2.000
			Normaal	4	2.000	1.750
			Moelijk	4	1.000	1.500
			20 Moelijk	4		2.500
Vlechten breedplaatvloeren	Losse wapening		8 Normaal	4	2.000	2.000

Activiteit	Type wapening	Gemiddelde diameter in mm	Klasse	Aantal vlechters	Dagproductie in kg	
					Woningbouw	Utiliteitsbouw
Vlechten kelderdekvloer	B-matten	n.v.t.	Zonder bijlegwapening	4	4.000	5.600
			Met bijlegwapening	4	3.000	4.800
	Staven	20	Normaal	4		3.040
			Zwaar	4		2.560
			25 Normaal	4		3.360
			Zwaar	4		2.800

Storten beton

Activiteit	Stortmethode	Aantal betonwerkers	Dagproductie in m ³
Storten keldervloer/-dek	Kraan	4	70
	Pomp	5	150

Activiteit	Uitvoering	Dikte in mm	Kubelinhoud in liters	Aantal betonwerkers	Dagproductie in m ³
Beton storten verdiepingsvloer	Op bekisting	Tot 160	750	5	80
			1.000	5	85
	Vanaf 160		750	5	90
			1.000	5	95

Activiteit	Stortmethode	Dikte in mm	Kubelinhoud in liters	Aantal betonwerkers	Dagproductie in m ³
Beton storten vloer gestapelde bouw	Kraan	Tot 300	1.000	5	65
		Vanaf 300	1.000	5	100
			1.500	5	120
	Pomp	Tot 300	N.v.t	5	200
		Vanaf 300	N.v.t	5	250

Storten verdiepingsvloer inclusief traditionele bekisting

Beukbreedte in m	Vloerdikte in mm	Wapening kg/m ³	Aantal woonlagen	Projectvloer oppervlakte in m ²	Kosten per m ² vloer
6,6	200	39	3	5.500	85,30
	220	39	4	8.500	86,60

Activiteit	Type bekisting	Verdiepingshoogte in m	Aantal ploegleden		Dagproductie in m ²	
			Timmerman	Betonwerker	Woningbouw	Utiliteitsbouw
Bekisten	Betonplex, badding, stempel	3,50	2	3	100	80
	Betonplex, badding, systeemsteiger	3,50	2	2		133
		4,50	2	3		100
	Kleinpaneelbekisting, valkop	3,50	2	3		120
		4,50	2	3		100
	Grootpaneelbekisting, stempel	3,50	3	2		40
		4,50	3	2		32
	Tafelbekisting, diversen	3,50	2	2	160	200
	Breedplaat, badding, stempel	3,50	2	2	200	120
		4,50	3	0		100
Ontkisten	Betonplex, badding, stempel	3,50	0	3	100	80
	Betonplex, badding, systeemsteiger	3,50	0	2		100
		4,50	0	3		80
	Kleinpaneelbekisting, valkop	3,50	0	3		120
		4,50	0	3		100
	Grootpaneelbekisting, stempel	3,50	0	3		60
		4,50	0	3		32
	Tafelbekisting, diversen	3,50	0	2	130	160
	Breedplaat, badding, stempel	3,50	0	2	130	100
		4,50	0	2		80

Kanaalplaatvloeren standaard

232122 101 kanaalplaatvloer [overspanning tot 6,50m] dikte 200mm	€	36.15 m2 ▼
232122 102 kanaalplaatvloer [overspanning tot 7,40m] dikte 200mm	€	37.19 m2 ▼
232122 103 kanaalplaatvloer [overspanning tot 8,30m] dikte 200mm	€	39.03 m2 ▼
232122 104 kanaalplaatvloer [overspanning tot 7,40m] dikte 260mm	€	45.09 m2 ▼
232122 105 kanaalplaatvloer [overspanning tot 8,30m] dikte 260mm	€	46.13 m2 ▼

Leggen van vloeren, verschil onduidelijk: Rechts misschien inclusief leggen....stond wel leggen bij

Tabel

Gebouwtype	Vloerdikte in mm	Maximale overspanning in m	Prijs per m ²	Toepassing	Vloerdikte in mm	Overspanning in m	Kosten per m ²		
Woningbouw	150	4,80	36.05	Woningbouw	150	4,8	43.00		
		5,70	36.05			5,7	42.95		
		6,00	36.05			6,0	43.20		
	200	7,20	37.25		200	7,2	44.40		
		8,10	38.45			8,1	45.60		
		7,20	40.25			260	7,2	48.65	
	260	8,10	41.50		8,1		49.90		
		9,60	42.65		9,6		51.05		
	Appartementen	200	7,20		56.50	Appartementen	200 (massief)	7,2	63.65
260		6,00	57.10	260	6,0		66.00		
		7,00	58.30		7,0		67.20		
		8,00	60.70		8,0		69.60		
320		8,00	69.75	320	8,0		79.55		
		10,00	70.95		10,0		80.75		
		12,00	72.15		12,0		81.95		
Utiliteitsbouw		150	5,50	37.90	Utiliteitsbouw		150	5,5	45.05
		200	6,00	37.90			200	6,0	45.30
	7,00		39.10	7,0		46.50			
	8,00		40.25	8,0		47.60			
	260	8,00	41.50	260		8,0	50.40		
		9,00	42.65			9,0	51.55		
		10,00	45.10			10,0	53.95		
	320	9,60	45.10	320		9,6	55.10		
		12,00	46.90			12,0	56.70		
		16,00	52.90			400	16,0	64.85	
	400	17,00	55.25	17,0			67.25		
		18,00	57.65	18,0			69.40		

Meerprijzen:

Onderdeel	Afmeting	Eenheid	Prijs per eenheid	Omschrijving	Afmeting in mm	Eenheid	Kosten per eenheid
Kanaaldeksel	Vloerdikte 200 mm	stuk	0.40	Raveelijzer	l = 2.400	stuk	286.00
	Vloerdikte 260 mm	stuk	0.60		l = 3.600	stuk	408.00
	Vloerdikte 320 mm	stuk	0.70	Leidingvloer eengezinswoning	d = 200	won (3 platen)	195.00
	Vloerdikte 400 mm	stuk	0.85		d = 260	won (3 platen)	270.00
Raveelijzer	2.400 x 150 x 100 x 10 mm	stuk	249.00	Toeslag projectgrootte tot 400 m²		project	875.00
	2.400 x 150 x 100 x 12 mm	stuk	249.00				
	3.600 mm	stuk	371.00				
Leidingvloer	Vloerdikte 200 mm	won	195.00				
	Vloerdikte 260 mm	won	270.00				

woningscheidend

232122 121 woningscheidende verdiepingsvloer [overspanning tot 7,20m] dikte 200mm	€	55.16 m2 ▼
232122 122 appartementenvloer [overspanning tot 6,50m] dikte 260mm	€	63.81 m2 ▼
232122 123 appartementenvloer [overspanning tot 7,30m] dikte 260mm	€	64.85 m2 ▼
232122 124 appartementenvloer [overspanning tot 8,40m] dikte 260mm	€	68.79 m2 ▼
232122 125 appartementenvloer [overspanning tot 8,50m] dikte 320mm	€	74.51 m2 ▼
232122 126 appartementenvloer [overspanning tot 10,00m] dikte 320mm	€	76.07 m2 ▼
232122 127 appartementenvloer [overspanning tot 12,00m] dikte 320mm	€	79.19 m2 ▼

Breedplaatvloeren

Traditioneel

232172 114 breedplaatvloer [vrij opgelegd, overspanning 5,4m], dikte 220mm	€	75.33 m2 ▼
232172 115 breedplaatvloer [doorgaand opgelegd, overspanning 5,4m], dikte 220mm	€	77.08 m2 ▼
232172 116 breedplaatvloer [vrij opgelegd, overspanning 6,3m], dikte 220mm	€	81.07 m2 ▼
232172 117 breedplaatvloer [doorgaand opgelegd, overspanning 6,3m], dikte 220mm	€	82.82 m2 ▼

Breedplaatvloeren inclusief leggen

Tabel

Vloerdikte in mm	Oppervlakte in m ²	Kosten per m ²
150	Tot 500	<u>58.75</u>
	Vanaf 500	<u>58.75</u>
200	Tot 500	<u>74.35</u>
	Vanaf 500	<u>72.30</u>
230	Tot 500	<u>83.45</u>
	Vanaf 500	<u>81.40</u>
250	Tot 500	<u>89.15</u>
	Vanaf 500	<u>87.10</u>

Maximale vloerdikte in mm	Bijlegwapening in kg per m ²	Prijs per m ²
150	2,50	<u>20.00</u>
180	3,75	<u>21.20</u>
200	4,10	<u>22.00</u>

Omschrijving

Dikte breedplaat 50 mm.

Vloeren hebben een gladde onderzijde.

Inclusief

- bijlegwapening.

Voorgespannen

232172 211 breedplaatvloer [overspanning <10m], dikte 150mm	€	64.02 m2 ▼
232172 212 breedplaatvloer [overspanning <10m], dikte 170mm	€	69.19 m2 ▼
232172 213 breedplaatvloer [overspanning <10m], dikte 200mm	€	75.53 m2 ▼

Breedplaat met gewichtsbesparende elementen

Combinatievloer

met lichtbetonelementen

232151 111 combinatievloer met druklaag 40mm [overspanning hoh <6m], dikte 200mm lichtbeton-vulelementen	€	51.59 m2 ▼
232151 112 combinatievloer met druklaag 50mm [overspanning hoh <6m], dikte 210mm lichtbeton-vulelementen	€	52.75 m2 ▼

Met PS-vulelementen

232151 221 combinatievloer met druklaag 30mm rc 3,5 [overspanning hoh <6m], dikte 200mm ps-vulelementen	€	40.20 m2 ▼
232151 222 combinatievloer met druklaag 40mm rc 3,5 [overspanning hoh <6m], dikte 210mm ps-vulelementen	€	41.36 m2 ▼

Leggen systeemvloer/combinatievloer

Vloertype	Rc in m ² .K/W	Overspanning in m	Vloerdikte / druklaag in mm	Kosten per m ²	
				Tot 200 m ²	Vanaf 200 m ²
Lichtbeton-elementen	n.v.t	4,8	200 / 40	59.75	52.55
			210 / 50	62.25	56.30
		5,7	200 / 40	59.75	52.55
			210 / 50	62.25	56.30
PS-hardschuim-elementen	3,0	4,8	200 / 40	52.45	44.90
			210 / 50	55.00	46.85
		5,7	200 / 40	53.00	45.45
			210 / 50	55.55	47.40
	3,5	4,8	200 / 40	53.55	45.95
			210 / 50	56.05	47.95
		5,7	200 / 40	54.05	46.50
			210 / 50	56.60	48.50
	4,0	4,8	200 / 40	54.60	47.05
			210 / 50	57.15	49.00
		5,7	200 / 40	55.20	47.65
			210 / 50	57.75	49.60
	5,0	4,8	200 / 40	55.75	48.20
			210 / 50	58.30	50.15
		5,7	200 / 40	56.30	48.75
			210 / 50	58.85	50.70

Ribcassettevloer

232161 121 ribbenvloer rc 3,5 dikte 350mm [overspanning max 6 m1]	€	36.48 m2 ▼
232161 131 ribbenvloer rc 4,0 dikte 350mm [overspanning max 6 m1]	€	37.06 m2 ▼
232161 141 ribbenvloer rc 4,5 dikte 350mm [overspanning max 6 m1]	€	38.03 m2 ▼
232161 151 ribbenvloer rc 5,0 dikte 350mm [overspanning max 6 m1]	€	39.01 m2 ▼
232161 161 ribbenvloer rc 6,5 dikte 400mm [overspanning max 6 m1]	€	41.92 m2 ▼

Staalplaatbetonvloeren

Ongestempelde lage platen

232191 101 staalplaat-betonvloer, overspanning <3m, dikte 130mm	€	52.96 m2 ▼
232191 102 staalplaat-betonvloer, overspanning <3,5m, dikte 150mm	€	56.35 m2 ▼
232191 103 staalplaat-betonvloer, overspanning <4m, dikte 150mm	€	56.95 m2 ▼
232191 104 staalplaat-betonvloer, overspanning <4,5m, dikte 150mm	€	65.42 m2 ▼

Gestempelde lage platen

232191 201 staalplaat-betonvloer, overspanning <4m, dikte 130mm	€	57.23 m2 ▼
232191 202 staalplaat-betonvloer, overspanning <5m, dikte 150mm	€	63.22 m2 ▼
232191 203 staalplaat-betonvloer, overspanning <6m, dikte 185mm	€	67.86 m2 ▼

Ongestempelde hoge platen

232192 101 staalplaat-betonvloer, overspanning <4, dikte 280mm	€	69.95 m2 ▼
232192 102 staalplaat-betonvloer, overspanning <5,4m, dikte 280mm	€	74.87 m2 ▼

Gestempelde hoge platen

232192 201 staalplaat-betonvloer, overspanning <6m, dikte 280mm	€	76.34 m2 ▼
232192 202 staalplaat-betonvloer, overspanning <8m, dikte 310mm	€	81.04 m2 ▼

Aanbrengen staalplaatbetonvloeren

Tabel

Activiteit	Overspanning in m	In velden	Staalplaatdikte in mm	Oppervlakte in m ²	Aantal monteurs	Dagproductie in m ²
Aanbrengen staalplaatbetonvloer	2,40	3	0,90	Tot 100	2	150
				100 - 500	2	175
				500 - 1.500	2	200
	3,00	3	0,90 of 1,20	Tot 100	2	175
				100 - 500	2	200
				500 - 1.500	2	250
	3,60	2	1,20	Tot 100	2	200
				100 - 500	2	250
				500 - 1.500	2	300

Storten staal-plaatbetonvloer

Tabel

Overspanning in mm	Vloerdikte in mm	Nuttige belasting KN/m ²	Wapening in kg/m ²	Oppervlakte in m ²	Kosten per m ²
2.500	110	4,0	4,0	Tot 100	64,95
				100 - 500	54,05
				500 - 1.500	49,10
4.000	150	4,0	4,0	Tot 100	71,40
				100 - 500	59,10
				500 - 1.500	54,15
6.000	180	3,6	2,0	Tot 100	71,35
				100 - 500	59,05
				500 - 1.500	54,10

TT-vloeren

232111 101 tt-plaatvloer, dikte 430mm	€	89.05 m2	▼
232111 102 tt-plaatvloer, dikte 530mm	€	99.05 m2	▼
232111 103 tt-plaatvloer, dikte 630mm	€	104.05 m2	▼
232111 104 tt-plaatvloer, dikte 730mm	€	109.05 m2	▼
232111 105 tt-plaatvloer, dikte 830mm	€	119.05 m2	▼

Houten vloeren

Vloeren met plaatmateriaal

232102 101 houten balklaag 75x150mm, hoh 600mm	€	44.14 m2	▼
232102 102 houten balklaag 75x175mm, hoh 600mm	€	44.95 m2	▼
232102 103 houten balklaag 75x200mm, hoh 600mm	€	46.62 m2	▼

Massief constructieve vloerelementen

232102 501 massief houten vloerelement [overspanning 2,75m], dikte 85mm 5-lagen	€	99.50 m2	▼
232102 502 massief houten vloerelement [overspanning 3,85m], dikte 115mm 5-lagen	€	113.50 m2	▼
232102 503 massief houten vloerelement [overspanning 4,10m], dikte 125mm 5-lagen	€	113.50 m2	▼
232102 505 massief houten vloerelement [overspanning 5,35m], dikte 165mm 5-lagen	€	130.50 m2	▼
232102 506 massief houten vloerelement [overspanning 5,65m], dikte 174mm 6-lagen	€	138.50 m2	▼
232102 507 massief houten vloerelement [overspanning 6,10m], dikte 201mm 7-lagen	€	154.50 m2	▼
232102 508 massief houten vloerelement [overspanning 8,15m], dikte 243mm 8-lagen	€	181.50 m2	▼
232102 509 massief houten vloerelement [overspanning 8,60m], dikte 252mm 8-lagen	€	178.50 m2	▼

Materialen

Wapening €/kg

Kruisnetten

Korte overstekken

Tabel

Maaswijdte in mm	Diameter in mm	Gewicht in kg/stuk	Prijs per kg
100 x 100	5	18,48	1,28
	6	26,36	1,21
	8	47,40	1,19
150 x 150	4	8,12	1,30
	5	12,63	1,27
	6	18,20	1,20
	8	32,39	1,18
	10	48,74	1,18

Lange overstekken

Tabel

Maaswijdte in mm	Diameter in mm	Afmeting bouwstaalmaat in mm	Gewicht in kg/stuk	Prijs per kg
100 x 100	8	3.500 x 2.200	49,57	1,18
	10	6.000 x 2.400	141,42	1,18
150 x 150	6	5.950 x 2.350	36,48	1,19
	7	5.960 x 2.360	49,77	1,18
	8	4.450 x 2.350	45,23	1,17
	9	6.000 x 2.400	79,04	1,17
	10	5.900 x 2.300	89,71	1,18

Losse staven

Tabel

Diameter in mm	Prijs per kg
8	1,14
10	1,13
12	1,12
16	1,11
20	1,11
25	1,11

Beton €/m³

Sterkteklasse	Milieuklass egroep	Consist entiege bied	Prijs per m ³ bij korrelgrootte grind in mm	
			4-32	4-16
C28/35		1 C1	97,45	104
		S2	98,65	106
		S3	99,15	106
		F4	104	111
		F5	107	114
		2 C1	98,1	105
		S2	99,6	107
		S3	100	107
		F4	105	112
		F5	108	115
		3 C1	101	108
		S2	102	109
		S3	104	111
		F4	109	116
		F5	112	119
C35/45		1 C1	108	115
		S2	109	116
		S3	111	118
		F4	116	123
		F5	119	126
		2 C1	108	115
		S2	109	116
		S3	111	118
		F4	116	123
		F5	119	126
		3 C1	108	115
		S2	109	116
		S3	111	118
		F4	116	123
		F5	119	126
C45/55		1 S3	131	138
		F4	137	144
C53/65		1 S3	152	152
		F4	147	154

Omschrijving

Omschrijving

Sterkteklasse: C cylinderdruksterkte / kubusdruksterkte.

Consistentiegebieden:

- C1 Aardvochtig;
- S2 Halfplastisch;
- S3 Plastisch;
- F4 Zeer plastisch;
- F5 Vloeibaar.

Staalplaten (van staalplaatbetonvloeren)

Tabel

Afmeting in mm	Gewicht per plaat in kg	Prijs per m ²
1.220 x 630	4,8	20,00
1.530 x 630	5,9	20,00
1.830 x 630	7,0	20,00
2.000 x 630	7,6	20,00

Ankers

282211 101 booranker m6	€	6.24 st	▼
282211 102 booranker m8	€	6.29 st	▼
282211 103 booranker m10	€	6.51 st	▼
282211 104 booranker m12	€	6.75 st	▼
282211 105 booranker m16	€	7.27 st	▼

282212 101 chemisch anker m8	€	23.60 st	▼
282212 102 chemisch anker m10	€	24.40 st	▼
282212 103 chemisch anker m12	€	24.40 st	▼
282212 104 chemisch anker m16	€	28.40 st	▼
282212 105 chemisch anker m20	€	46.00 st	▼
282212 106 chemisch anker m24	€	50.80 st	▼
282212 107 chemisch anker m30	€	57.20 st	▼

Omschrijving	Uitvoering	Afmeting in mm	Eenheid	Prijs per eenheid
Schroefhulzen	Zonder flens	M 10 x 60	100 stuk	35.65
		M 12 x 70	100 stuk	48.80
		M 16 x 100	100 stuk	82.60
		M 20 x 100	100 stuk	114.00
	Met flens	M 10 x 60	100 stuk	52.55
		M 12 x 70	100 stuk	63.80
		M 16 x 100	100 stuk	93.85
		M 20 x 100	100 stuk	155.00
	Met flens en omgezet achtereind	M 12 x 70	100 stuk	71.65
		M 16 x 100	100 stuk	114.00
Afstandhouders	Blokken met clips	M 10 x 60	100 stuk	56.30
		80 x 65 x 25	100 stuk	11.75
		83 x 70 x 30	100 stuk	26.70
		100 x 75 x 45	100 stuk	29.80
	Conisch	100 x 75 x 55	100 stuk	32.40
		20 1.000 stuk		46.85
		30 1.000 stuk		50.00
		40 1.000 stuk		63.50

Prefab

U-vormige liftschachten

Tabel

Uitvoering	Afmeting in mm		Prijzen per stuk bij een afname van				
	L1	B1	L2	4 stuks	8 stuks	12 stuks	16 stuks
Niet constructief	2.100	1.950	2.100	1.330.00	1.135.00	1.085.00	1.030.00
	2.830	2.010	2.830	1.430.00	1.230.00	1.175.00	1.120.00
	2.900	2.060	2.900	1.460.00	1.255.00	1.200.00	1.145.00
Constructief	2.100	1.950	2.100	1.805.00	1.585.00	1.515.00	1.445.00
	2.830	2.010	2.830	1.955.00	1.735.00	1.655.00	1.580.00
	2.900	2.060	2.900	2.000.00	1.775.00	1.695.00	1.615.00

Omschrijving

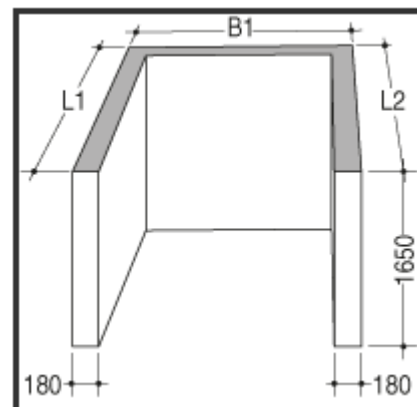
Prefab beton liftschachtelementen in U-vorm.

Elementdikte 180 mm en hoogte 1.650 mm.

Elementen, niet constructief, voorzien van wapeningsnet 40 kg/m².

Elementen, constructief, voorzien van wapeningsnetten 100 kg/m².

Elementen standaard voorzien van 10 gains (lengte 750 mm), 10 hulsankers (M16 x 600 mm) en 10 staafankers (M16



Arbeid

Uurtarieven

Ploeggrootte in aantal personen	Ploegsamenstelling	Prestatietoeslag in %	Loonkosten per uur	
			Exclusief AKWR	Inclusief AKWR
2	Functiegroep B, inzittende	4,25	31,02	35,18
	Functiegroep D, chauffeur	10,50	39,96	45,31
	Werkbus		7,03	7,97
	Ploegtarief		78,01	88,46
	Gemiddeld per persoon		39,01	44,23
3	Functiegroep B, inzittende	4,25	31,02	35,18
	Functiegroep C, inzittende	4,25	32,99	37,41
	Functiegroep D, chauffeur	10,50	39,96	45,31
	Werkbus		7,03	7,97
	Ploegtarief		111,00	125,87
	Gemiddeld per persoon		37,00	41,96
6	Functiegroep A, inzittende	4,25	29,31	33,24
	Functiegroep B, inzittende	4,25	31,02	35,18
		10,50	32,90	37,31
	Functiegroep C, inzittende	4,25	32,99	37,41
	Functiegroep D, inzittende	4,25	35,29	40,02
	Voorman functiegroep D, chauffeur	10,50	43,70	49,56
	Werkbus		7,03	7,97
	Ploegtarief		212,24	240,69
	Gemiddeld per persoon		35,37	40,12

Kolommen en balken

Activiteit	Type wapening	Gemiddelde diameter in mm	Klasse	Aantal vlechters	Dagproductie in kg
Vlechten kolommen	Korven	16	Eenvoudig	2	1.600
			Normaal	2	1.450
			Moelijk	2	1.000
Vlechten balken verdieping	Losse staven	12	Eenvoudig	2	1.230
			Normaal	2	1.000
			Moelijk	2	700

Activiteit	Aantal timmerlieden	Dagproductie in m	
		Woningbouw	Utiliteitsbouw
Bekisten, storten, ontkisten funderingsbalk	3	40	30
	4	50	40

Activiteit	Hoogte in m	Dikte in mm	Aantal betonwerkers	Dagproductie in m³
Beton storten kolom	3,30	300	3	5
		500	3	10
		700	3	20
	4,50	500	3	20
		700	3	24
	5,50	500	3	12
		700	3	15
	> 700		3	20
Beton storten balk	N.v.t.	300 x 400	4	30
		600 x 600	4	60

Activiteit	Onderdeel	Type bekisting	Hoogte	Aantal ploegleden		Dagproductie in m balk			
				Timmerman	Betonwerker	Woningbouw	Utiliteitsbouw		
Bekisten	Ondersteuning/bodem	Kinderbint, gording, stempel	Verdieping 3,30 m	2	0	14	16		
			Verdieping 4,50 m	2	1		12		
			Verdieping 5,50 m	3	0		16		
		Kinderbint, gording, systeemsteiger	Verdieping 3,30 m	2	0	17	19		
			Verdieping 4,50 m	2	0		16		
			Verdieping 5,50 m	3	0		20		
		Systeembekisting met tafels	Verdieping 3,30 m	3	0		40		
			Balkzijschotten	Betonplex	Balk 40 - 60 m	2	0	32	32
					Balk 60 - 80 m	2	0		22
	Balk 80 - 110 m	2			0		18		
Ontkisten	Ondersteuning/bodem	Kinderbint, gording, stempel	Verdieping 3,30 m	0	2	26	30		
			Verdieping 4,50 m	0	2		25		
			Verdieping 5,50 m	0	2		18		
		Kinderbint, gording, systeemsteiger	Verdieping 3,30 m	0	2	31	36		
			Verdieping 4,50 m	0	2		30		
			Verdieping 5,50 m	0	2		24		
		Systeembekisting met tafels	Verdieping 3,30 m	0	2		60		
			Balkzijschotten	Betonplex	Balk 40 - 60 m	0	2	80	80
					Balk 60 - 80 m	0	2		50
	Balk 80 - 110 m	0			2		40		

Activiteit	Onderdeel	Aantal timmerlieden	Eenheid	Dagproductie in m balk
Aanbrengen randbadding	Funderingsbalk		2 m balk	75
	Funderingspoeren / -putten		2 m badding	50
	Funderingsvloer		2 m badding	90

Vlechten kelderdekvloer

Activiteit	Type wapening	Gemiddelde diameter in mm	Klasse	Aantal vlechters	Dagproductie in kg	
					Woningbouw	Utiliteitsbouw
Vlechten kelderdekvloer	B-matten	n.v.t.	Zonder bijlegwapening	4	4.000	5.600
			Met bijlegwapening	4	3.000	4.800
	Staven	20	Normaal	4		3.040
			Zwaar	4		2.560
		25	Normaal	4		3.360
			Zwaar	4		2.800

Activiteit	Type bekisting	Vloerdikte in mm	Aantal ploegleden		Dagproductie in m ²	
			Timmerman	Betonwerker	Woningbouw	Utiliteitsbouw
Bekisten	Plaatbekisting	Tot 500	2	3	100	133
		510 - 750	2	3		100
	Kleinpaneel	Tot 500	1	3	100	130
		510 - 750	2	3		130
	Grootpaneel	Tot 500	1	2		100
	Traditioneel	Tot 500	3	2	80	100
	Breedplaat	N.v.t.	3	2	60	120
Ontkisten	Plaatbekisting	Tot 500	0	3	80	100
		510 - 750	0	3		90
	Kleinpaneel	Tot 500	0	3	80	130
		510 - 750	0	3		100
	Grootpaneel	Tot 500	0	2		100
	Traditioneel	Tot 500	0	3	60	80
	Breedplaat	N.v.t.	0	3	50	100

Vlechten vloer op zand

Activiteit	Type wapening	Gemiddelde diameter in mm	Klasse	Aantal vlechters	Dagproductie in kg
Vlechten vloer op zand	Matten	N.v.t.	Licht	4	4.000
	Staven		20 Licht	4	3.000
			Zwaar	4	2.500
			25 Licht	4	3.500
			Zwaar	4	2.750

Poeren

Activiteit	Formaat	Vorm	Aantal timmerlieden	Dagproductie in stuks
Bekisten, storten, ontkisten poer	Klein	Recht	2	6
		Trapezium	2	4
	Groot	N.v.t.	3	3

Activiteit	Onderdeel	Aantal timmerlieden	Eenheid	Dagproductie in eenheden
Maken	Schotten, plaatmateriaal, steunhout	2	m ² schot	30
Bekisten	Schotten recht/vierkant	2	m schot	20
	Schotten trapezium e.d.	2	m schot	15
Ontkisten	Schotten recht/vierkant	2	m schot	40
	Schotten trapezium e.d.	2	m schot	30

Maken betonskelet tunnelbekisting

Blokgrootte	Aantal eindwanden	Aantal tunnels	Aantal timmerlieden / betonwerkers	Dagproductie in woningen
2 woningen	2	2	5	1,00
	4	4	7	2,00
3 woningen	2	3	7	1,50
4 woningen	2	4	7	2,00
5 woningen	1	4	7	1,25

Bijlage F: Achtergrond CO₂ emissie beton In het werk gestort <10°

hoeveelheid beton	2,16 m ³	
betonkwaliteit	C30/37	
milieuklasse	XC1	
typering mengsel	IHW gestort < 10°C	
cementgehalte	305 kg/m ³	<i>emissie</i>
waarvan	75% CEMIII	69 kg CO ₂ /m ³
	25% CEM I	63 kg CO ₂ /m ³
vliegas toegevoegd	0 kg/m ³	0,0 kg CO ₂ /m ³
water	198 kg/m ³	0,1 kg CO ₂ /m ³
zand	726 kg/m ³	2,3 kg CO ₂ /m ³
grind	1.089 kg/m ³	3,4 kg CO ₂ /m ³
transport grondstoffen-centrale		11 kg CO ₂ /m ³
transport centrale-bouwplaats	50 km	40,0 kg CO ₂ /m ³
productie		6,6 kg CO ₂ /m ³
Totaal beton		214 kg CO₂/m³
wapeningshoeveelheid	140 kg/m ³	189 kg CO ₂ /m ³
transport wapening-bouwplaats	50 km	1,4 kg CO ₂ /m ³
Totaal staal		190 kg CO₂/m³
Totaal/m³		404 kg CO₂/m³
Resultaat		873 kg CO₂

Prefabbeton

hoeveelheid beton	2,16 m ³	
betonkwaliteit	C30/37	
milieuklasse	XC1	
typering mengsel	prefab snel	
cementgehalte	305 kg/m ³	<i>emissie</i>
waarvan	0% CEMIII	0 kg CO ₂ /m ³
	100% CEM I	250 kg CO ₂ /m ³
vliegas toegevoegd	0 kg/m ³	0,0 kg CO ₂ /m ³
water	198 kg/m ³	0,1 kg CO ₂ /m ³
zand	731 kg/m ³	2,3 kg CO ₂ /m ³
grind	1.097 kg/m ³	3,5 kg CO ₂ /m ³
transport grondstoffen-centrale		11 kg CO ₂ /m ³
transport centrale-bouwplaats	50 km	40,2 kg CO ₂ /m ³
productie		6,6 kg CO ₂ /m ³
Totaal beton		345 kg CO₂/m³
wapeningshoeveelheid	140 kg/m ³	189 kg CO ₂ /m ³
transport wapening-bouwplaats	50 km	1,4 kg CO ₂ /m ³
Totaal staal		190 kg CO₂/m³
Totaal/m³		536 kg CO₂/m³
Resultaat		1157 kg CO₂

Bijlage G: Achtergrond gebruikte formules en spreadsheets

Ombouwen slankheidsregel EC2

$$\lambda_{lim} > \frac{20 * A * B * C}{\sqrt{n}}$$

met $\lambda_{lim} = \frac{l_0}{i}$, A=0.7, B=1.1, C=0.7(niet geschoord) en $n=N_{ed}/(A_c * f_{cd})$

$$\lambda_{lim} > \frac{20 * 0.7 * 1.1 * 0.7}{\sqrt{\frac{N_{ed}}{A_c * f_{cd}}}}$$

Bij vierkante, **ongeschoorde**, kolommen:

$$\lambda_{lim} = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{\frac{b * h^3}{12}}{b * h}} = \sqrt{\frac{b^4}{12 * b^2}} = \sqrt{\frac{b^2}{12}} = \frac{b}{\sqrt{12}}$$

$$\frac{l_0}{\frac{b}{\sqrt{12}}} = \frac{l_0 * \sqrt{12}}{b} > \frac{20 * 0.7 * 1.1 * 0.7}{\sqrt{\frac{N_{ed}}{b * b * f_{cd}}}}$$

$$\sqrt{\frac{N_{ed}}{b * b * f_{cd}}} * \frac{l_0 * \sqrt{12}}{b} > 20 * 0.7 * 1.1 * 0.7 = 10.78$$

$$\sqrt{\frac{N_{ed}}{b * b * f_{cd}}} * \frac{l_0}{b} > 3.11$$

$$\frac{N_{ed}}{b * b * f_{cd}} * \left(\frac{l_0}{b}\right)^2 > 9.68$$

$$\frac{N_{ed} * l_0^2}{b * b * f_{cd} * b^2} > 9.68$$

$$\frac{N_{ed} * l_0^2}{b^4 * f_{cd}} = \frac{N_{ed} * l_0^2}{A_c^2 * f_{cd}} > 9.68$$

$$A_{c;ben} = \sqrt{\frac{N_{ed} * l_0^2}{9.68 * f_{cd}}}$$

Bij vierkante, **geschoorde**, kolommen:

$$\lambda_{lim} = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{\frac{b * h^3}{12}}{b * h}} = \sqrt{\frac{b^4}{12 * b^2}} = \sqrt{\frac{b^2}{12}} = \frac{b}{\sqrt{12}}$$

$$\frac{l_0}{\frac{b}{\sqrt{12}}} = \frac{l_0 * \sqrt{12}}{b} > \frac{20 * 0.7 * 1.1 * 2.2}{\sqrt{\frac{N_{ed}}{b * b * f_{cd}}}}$$

$$\sqrt{\frac{N_{ed}}{b * b * f_{cd}}} * \frac{l_0 * \sqrt{12}}{b} > 20 * 0.7 * 1.1 * 0.7 = 33.88$$

$$\sqrt{\frac{N_{ed}}{b * b * f_{cd}}} * \frac{l_0}{b} > 9.78$$

$$\frac{N_{ed}}{b * b * f_{cd}} * \left(\frac{l_0}{b}\right)^2 > 95.7$$

$$\frac{N_{ed} * l_0^2}{b * b * f_{cd} * b^2} > 98.7$$

$$\frac{N_{ed} * l_0^2}{b^4 * f_{cd}} = \frac{N_{ed} * l_0^2}{A_c^2 * f_{cd}} > 95.7$$

$$A_{c;ben} = \sqrt{\frac{N_{ed} * l_0^2}{95.7 * f_{cd}}}$$

Bij 1:3, **geschoorde**, kolommen/penanten: waarin h is variabele als x*b

$$\lambda_{lim} = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{\frac{b * h^3}{12}}{b * h}} = \sqrt{\frac{b^4}{12 * b^2}} = \sqrt{\frac{b^2}{12}} = \frac{b}{\sqrt{12}}$$

$$\frac{l_0}{\frac{b}{\sqrt{12}}} = \frac{l_0 * \sqrt{12}}{b} > \frac{20 * 0.7 * 1.1 * 2.2}{\sqrt{\frac{N_{ed}}{b * (x * b) * f_{cd}}}}$$

$$\sqrt{\frac{N_{ed}}{b * (x * b) * f_{cd}}} * \frac{l_0 * \sqrt{12}}{b} > 20 * 0.7 * 1.1 * 0.7 = 33.88$$

$$\sqrt{\frac{N_{ed}}{b^2 * x * f_{cd}}} * \frac{l_0}{b} > 9.78$$

$$\frac{N_{ed}}{b^2 * x * f_{cd}} * \left(\frac{l_0}{b}\right)^2 > 95.7$$

$$\frac{N_{ed} * l_0^2}{b^2 * x * f_{cd} * b^2} > 98.7$$

$$\frac{N_{ed} * l_0^2}{x * b^4 * f_{cd}} > 95.7$$

$$x > \frac{N_{ed} * l_0^2}{95.7 * b^4 * f_{cd}}$$

Benodigde beugels bij dwarskracht					
Ved	270	kN	Ved	660	kN
d	550	mm	d	750	mm
Hoek	21,8	°	Hoek	21,8	°
fywd	400	N/mm ²	fywd	400	N/mm ²
z	495		z	675	
cot θ	2,50		cot θ	2,50	
Asw/s	0,55		Asw/s	0,98	
h.o.h. afstand op basis van Ø			h.o.h. afstand op basis van Ø		
Ø	8	mm	Ø	10	mm
sleden	3		sleden	3	
h.o.h. benodigd:	276		h.o.h. benodigd:	241	
Diameter op basis van h.o.h. afstand			Diameter op basis van h.o.h. afstand		
h.o.h.	250	mm	h.o.h.	150	mm
sleden	2		sleden	3	
Ø benodigd:	9,3	mm	Ø benodigd:	7,9	mm

Spreadsheet staal-beton kolommen

Toetsing centrisch belaste staal-beton kolom					
Ned	3900				
NG,Ed	2340	(blijvende belasting)			
L	3500	mm			
Staal	HEA240				
Aa	7493	mm	Ia	27690000	mm ⁴
f _{yd}	460	N/mm ²	Ea	210000	N/mm ²
Beton					
b	350	mm	Ac	114555	mm ²
h	350	mm	Ic	1,21E+09	mm ⁴
f _{cd}	20	N/mm ²	Ec	33000	N/mm ²
			E _{ceff}	11786	N/mm ²
Wapening					
As	452	mm ²	∅	12	mm
f _{sy}	435	N/mm ²	aantal	4	
E _{s eff}	210000	N/mm ²	I _s	8866831	mm ⁴
E _{I,eff}	1,6E+13	Nmm ²			
N _{pl,Rk}	6594	kN			
N _{pl,Rd}	5591	kN			
N _{cr,z}	13102	kN			
λ	0,71	relatieve slankheid			
N _{rd}	4020	kN			
δ	0,62	Controle staalbijdrage			
knikkromme	c	vlgs tabel 6.5			
χ	0,719	Knikfactor			

Uit dictaat Knik en Eurocode Welleman						
λ	Knikfactor χ					
	a0	a	b	c	d	
0	1	1	1	1	1	1
0,1	1	1	1	1	1	1
0,2	1	1	1	1	1	1
0,3	0,986	0,977	0,964	0,949	0,923	
0,4	0,97	0,953	0,926	0,897	0,85	
0,5	0,951	0,924	0,884	0,843	0,779	
0,6	0,928	0,89	0,837	0,785	0,71	
0,7	0,896	0,848	0,784	0,725	0,643	
0,8	0,853	0,796	0,724	0,662	0,58	
0,9	0,796	0,734	0,661	0,6	0,521	
1	0,725	0,666	0,597	0,54	0,467	
1,1	0,648	0,596	0,535	0,484	0,419	
1,2	0,573	0,53	0,478	0,434	0,376	
1,3	0,505	0,47	0,427	0,389	0,339	
1,4	0,446	0,418	0,382	0,349	0,306	
1,5	0,395	0,372	0,342	0,315	0,277	
1,6	0,352	0,333	0,308	0,284	0,251	
1,7	0,315	0,299	0,278	0,258	0,229	
1,8	0,283	0,27	0,252	0,235	0,209	
1,9	0,256	0,245	0,229	0,214	0,192	
2	0,232	0,223	0,209	0,196	0,177	
2,1	0,212	0,204	0,192	0,18	0,163	
2,2	0,194	0,187	0,176	0,166	0,151	
2,3	0,178	0,172	0,163	0,154	0,14	
2,4	0,164	0,159	0,151	0,143	0,13	
2,5	0,151	0,147	0,14	0,132	0,121	
2,6	0,14	0,136	0,13	0,123	0,113	
2,7	0,13	0,127	0,121	0,115	0,106	
2,8	0,122	0,118	0,113	0,108	0,1	
2,9	0,114	0,111	0,106	0,101	0,094	
3	0,106	0,104	0,099	0,095	0,088	

Toetsing centrisch belaste staal-beton kolom					
Ned	3750				
NG,Ed	2250	(blijvende belasting)			
L	6700	mm			
<i>Staal</i>	HEA280				
Aa	9730	mm ²	Ia	136700000	mm ⁴
f _{yd}	460	N/mm ²	Ea	210000	N/mm ²
<i>Beton</i>					
b	400	mm	Ac	149818	mm ²
h	400	mm	Ic	1,984E+09	mm ⁴
f _{cd}	20	N/mm ²	Ec	33000	N/mm ²
			E _{ceff}	11786	N/mm ²
<i>Wapening</i>					
As	452	mm ²	∅	12	mm
f _{sy}	435	N/mm ²	aantal	4	
Es eff	210000	N/mm ²	I _s	12316300	mm ⁴
EI,eff	4,5E+13	Nmm ²			
N _{pl,Rk}	8522	kN			
N _{pl,Rd}	7219	kN			
N _{cr,z}	9965	kN			
λ	0,92	relatieve slankheid			
N _{rd}	4224	kN			
δ	0,62	Controle staalbijdrage			
knikkromme	c	vlgns tabel 6.5			
χ	0,585	Knikfactor			

Berekening staal-beton ligger					
Materialen		Vloer		Belastingen	
Staalprofiel	IPE450	Hoogte plaat(hp)	0 mm	Pb(excl ligger)	97,1 kN/m
Staalkwaliteit	S355	Tot. Vloerhoogte	300 mm	Vb	75,0 kN/m
Betonkwaliteit	C30/37	b1	50 mm	CC-klasse	2,0
Geometrie		b2	50 mm	ψ_0	0,4
Overspanning	5,75 m	b3	100 mm	Pb incl.	97,9 kN/m
Afstand tot 1e evenwijdige ligger	8 m	b4	100 mm	Q	230,0 kN/m
Overspanning staalplaat/beton	Massieve betonplaat	Plaatdikte	1,2 mm	Med	950 kNm
Deuvels		b0	75 mm	Ved	826 kn
Aantal deuvels per rib	2	Htotaal	750	Toelaatbare δ	0,004 *L
Diameter deuvels	19 mm	beff	1438 mm	Toelaatbare bijk. δ	0,002 *L
Lengte deuvels	85 mm	Controle doorsnedeklasse			
fu	450 N/mm ²	Flens		1	
Type deuvel	Doorgelaste deuvels	Lijf		1	
Prd	65 kN	Maatgevend		1	
		akkoord			
	Capaciteit		uc		
<u>Mpl;rd;volledig schuifsterk</u>	1590 kNm		0,60	Neutrale lijn in beton, basisgeval 1 van toepassing	
<u>Mpl;rd;niet volledig schuifsterk</u>	1290 kNm		0,74	Neutrale lijn in flens, basisgeval 6 van toepassing	
<u>Vpl;rd(zonder beton aandeel)</u>	1042 kN		0,64		
Deuvels volledig schuifsterk		Deuvels niet volledig schuifsterk(alleen geschikt voor in 2 richtingen symmetrische profielen)			
Vled	3507 kN	n = Aantal deuvels per liggerhelft			30 stuks
Deuvels benodigd per liggerhelft	54 stuks	NC=nPrd			1960 kN
Deuvels aanwezig per liggerhelft	56 stuks	η		0,56 η_{min}	0,48
Doorbuiging wel ondersteund tijdens uitvoering		Doorbuiging wel ondersteund tijdens uitvoering			
		Extra buiging door deuvelvorming(factor)			1,00
Eind	7 mm	Eind			7 mm
Bijkomend	3 mm	Bijkomend			3 mm

Duurzaam en economisch wapeningspercentage:

$M_{ed} = 1/8 * q * l^2$ en $z = 0.9 * d$

$$A_{s;ben} = \frac{M_{ed}}{0.9 * d * f_{yd}}$$

$$A_{s;ben} = \frac{\frac{1}{8} * q * l^2}{0.9 * d * f_{yd}}$$

$$d = \frac{\frac{1}{8} * q * l^2}{0.9 * A_{s;ben} * f_{yd}}$$

Bij 1% wap en $b = 1/2 * h$

$A_{sben} = A_c/100 = b * h/100 = 1/2 * h^2/100$ $d = 0.95 * h$

$$0.95 * h = \frac{\frac{1}{8} * q * l^2}{0.9 * \frac{1}{2} * \frac{h^2}{100} * f_{yd}} = \frac{25 * q * l^2}{0.9 * h^2 * f_{yd}} = \frac{q * l^2}{h^2 * 15.66}$$

$$h^3 = \frac{q * l^2}{16.48}$$

Indien M_{ed} anders is dan $1/8 * q * l^2$:

$$A_{s;ben} = \frac{M_{ed}}{0.9 * d * f_{yd}} \quad \rightarrow \quad d = \frac{M_{ed}}{0.9 * A_{s;ben} * f_{yd}}$$

Bij 1% wap en $b = 2.5 * h$

$A_{sben} = A_c/100 = b * h/100 = 2.5 * h^2/100$ $d = 0.95 * h$

$$0.95 * h = \frac{M_{ed}}{0.9 * 2.5 * \frac{h^2}{75} * 435} = \frac{M_{ed}}{13.05 * h^2}$$

$$h^3 = \frac{M_{ed}}{13.74}$$

Bij 1% wap en $b = 0.5 * h$

$A_{sben} = A_c/100 = b * h/100 = 0.5 * h^2/100$ $d = 0.95 * h$

$$0.95 * h = \frac{M_{ed}}{0.9 * 0.5 * \frac{h^2}{75} * 435} = \frac{M_{ed}}{2.61 * h^2}$$

$$h^3 = \frac{M_{ed}}{2.75}$$

Staalconstructie op stijfheid:

q-last:

$$\delta = \frac{5*q*l^4}{384*EI} \quad \text{met} \quad \delta_{totaal} = \frac{1}{250} * l, \text{ Estaal}=210000 \text{ en } q=q_{bgt}$$

$$\frac{1}{250} * l = \frac{5*q*l^4}{384*210000*I}$$

$$I = \frac{5*q*l^4}{384*\frac{1}{250}*210000*l} = \frac{5*q*l^3}{322560} = \frac{q*l^3}{64512}$$

Puntlast:

$$\delta = \frac{F*l^3}{48*EI} \quad \text{met} \quad \delta_{totaal} = \frac{1}{250} * l, \text{ Estaal}=210000 \text{ en } F=F_{bgt}$$

$$\frac{1}{250} * l = \frac{F*l^3}{48*210000*I}$$

$$I = \frac{F*l^3}{48*\frac{1}{250}*210000*l} = \frac{F*l^2}{40320}$$

Ontwerp vakwerk					
Diagonaal	HEA300		Adiagonaal	11250	mm ²
Profiel boven	HEA400		Iboven	450700000	mm ⁴
Profiel onder	HEA400		I onder	450700000	mm ⁴
h vakwerk(buitenmaat)	2500	mm	Zboven	1055	mm
Med	14000	kNm	Zonder	1055	mm
Staalkwaliteit	S460		Aboven	15900	mm ²
Hoek diagonaal	45	graden			
Lknik	2110	mm	Aonder	15900	mm ²
Doorbuiging: L/	250		Itot	36.295.595.000	mm ⁴
Overspanning	110000	mm	Ned	6635	kN
umax	440		Nrd, knik	7314	kN
Iben	12.003.970.000		uc knik	0,91	
λ			Uc trek	0,91	
			Uc diagonaal	0,91	
Berekening knikfactor					
Lcr	2110	mm			
E	210000	N/mm ²			
i	168				
λ1	67				
λ	0,19	relatieve slankheid			
knikkromme	a0	vlgns tabel 6.5			
χ tabel	1,00	Knikfactor			
Φ	0,52				
χ berekend	1,00				
kg staal/m					
Bovenligger	125				
Onderligger	125				
Diagonaal(onder hoek)	125				
Verticaal=diagonaal	88				
Kg Totaal per m	463				
CO ₂ emissie materiaal	222	kg/m			
CO ₂ emissie verbindingen	20%	€/m			
CO ₂ emissie totaal per m	267	€/m			
Kosten materiaal	879	€/m			
Kosten verbindingen	20%	€/m			
Kosten vakwerk per m	1055	€/m			

Boogvormen

Functie voorschrift hyperbool bij 3 punten

De standaardfunctie voor de grafiek van een hyperbool.

$$f(x) = \frac{1}{p(x-q)} + r$$

Voorbeeld

Geef de formule voor de hyperbool door de punten A(0,0), B(5,5) en C(13,8).

Uitwerking

$$f(x) = \frac{1}{p(x-q)} + r$$

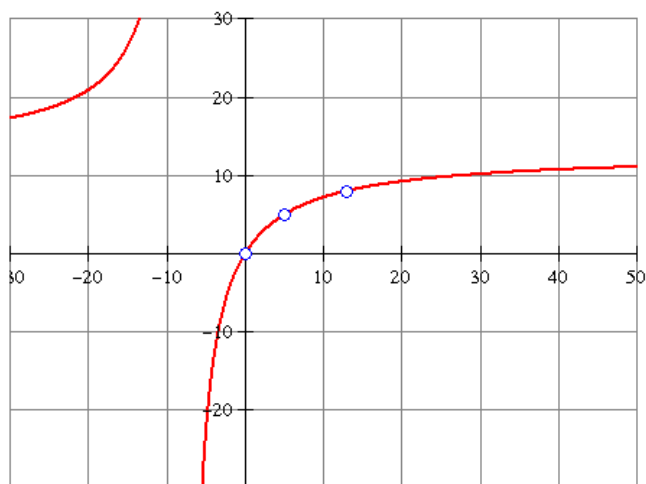
$$1. \frac{1}{p(0-q)} + r = 0 \Rightarrow -\frac{1}{pq} + r = 0$$

$$2. \frac{1}{p(5-q)} + r = 5$$

$$3. \frac{1}{p(13-q)} + r = 8$$

Oplossen geeft :

$$p = -\frac{25}{2496}, q = -\frac{39}{5} \text{ en } r = \frac{64}{5}$$



verankering en overlapping langsstaven volgens eurocode NEN-EN 1992-1-1+C2 art. 8.4 en art.8.7						
Beperkingen						versie 1.02
verankering en overlapping van gebundelde staven is <u>niet</u> beschouwd						
benodigde dwarswapening in het overlappingsgebied moet worden bepaald volgens onderstaand aangegeven norm.						
Algemeen:						
ontwerpsituatie	blijvend en tijdelijk			γ_c	1,5	§2.4.2.4 + 2.4.2.5
aanhectomstandigheden	bovenstaaf algemeen			n_1	0,7	§8.4.2 figuur 8.2
betonkwaliteit	C30/37			f_{bd}	2,13 N/mm ²	§8.4.2(2)
staafdiameter	25 mm			n_2	1,0	§8.4.2(2)
staalspanning σ_{sd}	366,8044762 N/mm ²					
zijdekking c_1	25 mm					
dekking c	25 mm					
hoh staven a	100 mm			(alleen maatgevend bij kleine tussenafstand)		
type wapening	trek					
ruwheid staaf	geribd					
Type verankering:						
vorm van de staaf	rechte staven			α_1	1,00	§8.4.4
$cd=\min((a-d)/2 ; c_1 ; c)$	$= \min((100-25)/2 ; 25 ; 25) = 25 \text{ mm}$			α_2	1,00	§8.4.4
Omliggende wapening tbv α_3 en α_4 :						
type constructie	balk			α_3	1,00	§8.4.4
opsluiting door dwarswapening, niet gelast aan de hoofdwapen	nee					
opsluiting door gelaste dwarswapening						
			nee	α_4	1,00	§8.4.4
Reductie α_5 :						
opsluiting door dwarsdruk	nee			α_5	1,00	§8.4.4
				$\alpha_2*\alpha_3*\alpha_5$	1,00 > 0,7	
Reductie α_6 : (overlapping)						
ρ_1	100 %			α_6	1,50	
basis verankeringslengte $l_{b,rqd}$						
$l_{b,rqd} = (\varnothing/4) * (\sigma_{sd}/f_{bd}) * r_f > l_{b,min}$	$= (25/4) * (366,8044762/20081/$	1077 mm	$l_{b,min}$	323 mm	§8.4.3 (8.3)	
Verankeringslengte						
rekenwaarde verankeringslengte l_{bd}						
$l_{bd} = \alpha_1 (\alpha_2 \alpha_3 \alpha_5) \alpha_4 l_{b,rqd} > l_{b,min}$	$= 1*1*1*1077 > 323$	1077 mm	§8.4.4 (8.4)			
Overlappingslengte						
Omliggende wapening tbv α_3 :						
$l_o = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_5 \alpha_6 l_{b,rqd} > l_{o,min}$	$= 1*1*1*1*1,5*1077 > 485$	1615 mm	$l_{o,min}$	485 mm	§8.7.3 (8.10)	

Wanddikte	250	mm										
Tussenruimte	1200											
Om y as	L(mm)	B(mm)	A(mm ²)	I-Eigen(mm ⁴)	Arm(mm)	A*arm(mm ²)	Hartlijn(mm)	z(mm)	A*z ²	Itot(mm ⁴)	E _{max} (mm)	W _{tot} (mm ³)
A	250	2100	5,3E+05	1,1E+07	2875	1,5E+09		1019	5,4E+11	5,4E+11		
B	3000	500	1,5E+06	3,8E+08	1500	2,3E+09		-356	1,9E+11	1,9E+11		
Totaal deel 1			2,0E+06	3,9E+08		3,8E+09	1856		7,4E+11	7,4E+11	1856	4,0E+08
Om y as	L(mm)	B(mm)	A(mm ²)	I-Eigen(mm ⁴)	Arm(mm)	A*arm(mm ²)	Hartlijn(mm)	z(mm)	A*z ²	Itot(mm ⁴)		W _{tot} (mm ³)
C	250	2350	5,9E+05	1,2E+07	1325	7,8E+08		-775	3,5E+11	3,5E+11		
D	1800	250	4,5E+05	6,8E+07	2100	9,5E+08		0	0,0E+00	6,8E+07		
E	250	2350	5,9E+05	1,2E+07	2875	1,7E+09		775	3,5E+11	3,5E+11		
Totaal deel 2			1,6E+06	9,2E+07		3,4E+09	2100		7,1E+11	7,1E+11	900	7,8E+08
Totaal y-as			3,7E+06	4,8E+08		7,2E+09	-81		1,4E+12	1,4E+12	3081	1,2E+09
Excentriciteit	5071	mm										
Om x-as	L(mm)	B(mm)	A(mm ²)	I-Eigen(mm ⁴)	Arm(mm)	A*arm(mm ²)	Hartlijn(mm)	z(mm)	A*z ²	Itot(mm ⁴)		W _{tot} (mm ³)
M	250	2750	6,9E+05	1,4E+07	125	8,6E+07		-1280	1,1E+12	1,1E+12		
N	2600	750	2,0E+06	4,2E+08	1300	2,5E+09		-105	2,1E+10	2,2E+10		
O	250	2750	6,9E+05	1,4E+07	2475	1,7E+09		1070	7,9E+11	7,9E+11		
P	250	1300	3,3E+05	6,8E+06	2475	8,0E+08		1070	3,7E+11	3,7E+11		
Totaal x-as			3,7E+06	4,6E+08		5,1E+09	1405		2,3E+12	2,3E+12	1405	1,6E+09
Excentriciteit	5695	mm										

Berekening aanpendelende belasting en resulterende kracht scheefstand

Belastingen	BGT	UGT					
Dragende wanden	16,2	21,9					
Gevels	3	4,1					
Dak	6,5	8,9					
Woning	7,8	12,2					
Restaurant	12,6	19,8					
Garage	10,1	14,9					
			Aanpendelend		Direct aangrijpend		
Onderdeel	Bouwlaag	Oppervlak/lengte	BGT	UGT	Oppervlak/lengte	BGT	UGT
Dak	9	67	436	598	38	247	339
Woning	8	67	523	817	38	296	464
Gevels	8	45	135	182	13	39	53
Dragende wanden	8	62	996	1345	42	674	910
Woning	7	70	546	854	38	296	464
Gevels	7	45	135	182	13	39	53
Dragende wanden	7	72	1165	1572	42	674	910
Woning	6	73	569	891	38	296	464
Gevels	6	45	135	182	13	39	53
Dragende wanden	6	82	1333	1800	42	674	910
Woning	5	74	577	903	38	296	464
Gevels	5	45	135	182	13	39	53
Dragende wanden	5	88	1431	1932	42	674	910
Woning	4	76	593	927	38	296	464
Gevels	4	45	135	182	13	39	53
Dragende wanden	4	94	1529	2065	42	674	910
Woning	3	78	608	952	38	296	464
Gevels	3	45	135	182	13	39	53
Dragende wanden	3	99	1604	2165	42	674	910
Restaurant	2	79	995	1564	38	479	752
Gevels	2	45	135	182	13	39	53
Dragende wanden	2	55	891	1203	42	674	910
Garage	1	85	859	1267	38	384	566
Dragende wanden	1	150	2430	3281	13	211	284
Garage	0	85	859	1267	42	420	620
Dragende wanden	0	150	2430	3281	13	211	284
		Totaal	21319	29958			
Bouwlaag	Aanpendel	Scheefstand(kN)	Mscheefstand	Direct(BGT)	Direct(UGT)		
9	598	1	31	247	339	1,37	
8	2345	4	110	1009	1426	1,41	
7	2609	4	110	1009	1426	1,41	
6	2873	5	106	1009	1426	1,41	
5	3017	5	96	1009	1426	1,41	
4	3174	5	85	1009	1426	1,41	
3	3299	6	72	1009	1426	1,41	
2	2949	5	45	1192	1715	1,44	
1	4547	8	46	594	851	1,43	
0	4547	8	23	631	904	1,43	
	29958	50	724	8720	12365	1,42	

Scheurvorming staaf op trek

Hierin zijn de volgende begrippen opgenomen:

- $\varnothing$: Staafdiameter = 32mm
- ρ : Wapeningsverhouding = $8 \cdot 804 / 400 \cdot 800$ = 0.018
- σ_s : Wapeningsspanning = $435 \cdot 0.68 \cdot 9651 / 8138$ = 309N/mm²
- α_e : Verhouding elasticiteit modulus beton en wapening
 $E_s / E_{cm} = 200000 / 17143 =$ = 11.7
 - Waarin $E_{cm} = f_{ck} / 1.75\text{‰} = 30 / 0.00175$ = 17143N/mm²
- ε_{cs} : rek in het staal = $2407 \cdot 1000 / 9651 / 200000$ = 0.0015mm/m
- f_{ctm} : Treksterkte beton = 4.2N/mm²

Bij de berekening wordt enkel rekening gehouden met de wapening aanwezig voor scheurvorming. De buigtrekwapening draagt hierin niet bij.

$$w_k = \frac{25}{4 \cdot 0.018} * \left[309 - 0.3 * \frac{4.2}{0.018} * (1 + 0.018 * 11.7 + 0.0015 * 200000) \right] * \frac{1}{200000}$$

$$w_k = \frac{340 * (522)}{200000} = 0.89mm$$

Bijlage H: Invoer rekensoftware

```

> restart;
> b := 350 : h := 750 : Iboog :=  $\frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 \cdot 10^{-12}$  : Aboog :=  $b \cdot h \cdot 10^{-6}$  :
      Eboog := 10000 · 103 : EI := Eboog · Iboog : L := 9.5 : F := 3900 : f
      := 3.075 : EA := Eboog · Aboog : Qeg := Aboog · 25 :
> z := -f · sin  $\left( \frac{\text{Pi} \cdot x}{L} \right)$  :
> q := F · Dirac  $\left( x - \frac{L}{2} \right)$  + Qeg :
> DV2 := EI · diff( w(x), x$4 ) + H · diff( z, x$2 ) = q :
> w := rhs( dsolve( DV2, w(x) ) ) :
> phi := -diff( w, x ) : kappa := diff( phi, x ) : M := EI · kappa : Dwarskracht
      := H · sin( alpha ) + Verticalekracht · cos( alpha ) : Verticalekracht
      := ( -EI · diff( w, x$3 ) - H · diff( z, x ) ) : T := -H · cos( alpha )
      + Verticalekracht · sin( alpha ) :
> #RVW
> x := 0 : eq1 := w = 0 : eq2 := M = 196528 · phi :
> x := L : eq3 := w = 0 : eq4 := M = -196528 · phi :
> sol := solve( {eq1, eq2, eq3, eq4}, {_C1, _C2, _C3, _C4} ) :
> assign( sol ); x := 'x':
> w :
> eq5 := -int( diff( w, x ) · diff( z, x ), x = 0 .. L ) =  $\frac{H \cdot L}{EA}$  :
> H := evalf( solve( eq5, H ) ) :
> plot( { -M }, x = 0 .. L, ) :
> evalf( maximize( M, x = 0 .. L ) ) : evalf  $\left( \text{maximize} \left( M, x = 0 .. \frac{L}{3} \right) \right)$  :
      evalf( minimize( M, x = 2 .. 4 ) ) :
> plot( -w · 1000, x = 0 .. L ) :
> alpha := arctan( diff( z, x ) ) :
> plot( { Dwarskracht, Verticalekracht }, x = 0 .. L ) :
> plot( { -T, }, x = 0 .. L, 0 .. 4500 ) :
> x := 0 : T : M : Verticalekracht : Dwarskracht : x := 'x':
> x :=  $\frac{L}{2.000001}$  : M : w · 1000 : Verticalekracht : Dwarskracht : T : x := 'x'
      ':
> plot( { -T, }, x = 6 .. 9, 3220 .. 3240 ) :
```

Bijlage I: Technosoft in- en uitvoer

Technosoft MN-Kappa release 6.01

20 mei 2018

Project :
Onderdeel :
Dimensies : kN;m;rad (tenzij anders aangegeven)
Datum : 21/04/2018
Bestand : MNK boog_Med max.mnk
Referentieperiode: 50 jaar

Toegepaste normen volgens Eurocode met Nederlandse NB

Beton NEN-EN 1992-1-1:2011 (nl) C2/A1:2015 (nl) NB:2016 (nl)

Invoer

Geometrie

Elementtype : Balk
Scheve buiging : Ja
Treksterkte $f_{ctm,fl}$: Nee
Doorsnede vorm : 0:Rechthoek
Breedte : 350 Hoogte : 750
Betonkwaliteit : C55/67 (kruipfactor=1.49)

Doorsnedegrootheden

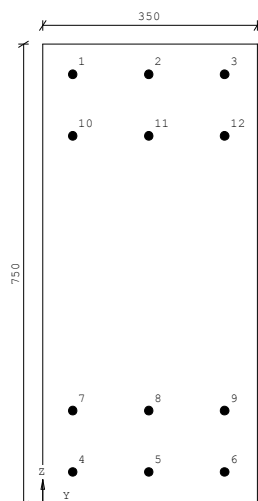
Grootheden exclusief wapening

A_b = 262500 mm²
 z_z = 375.0 mm y_z = 175.0 mm
 I_y = 12304687500 mm⁴ I_z = 2679687500 mm⁴

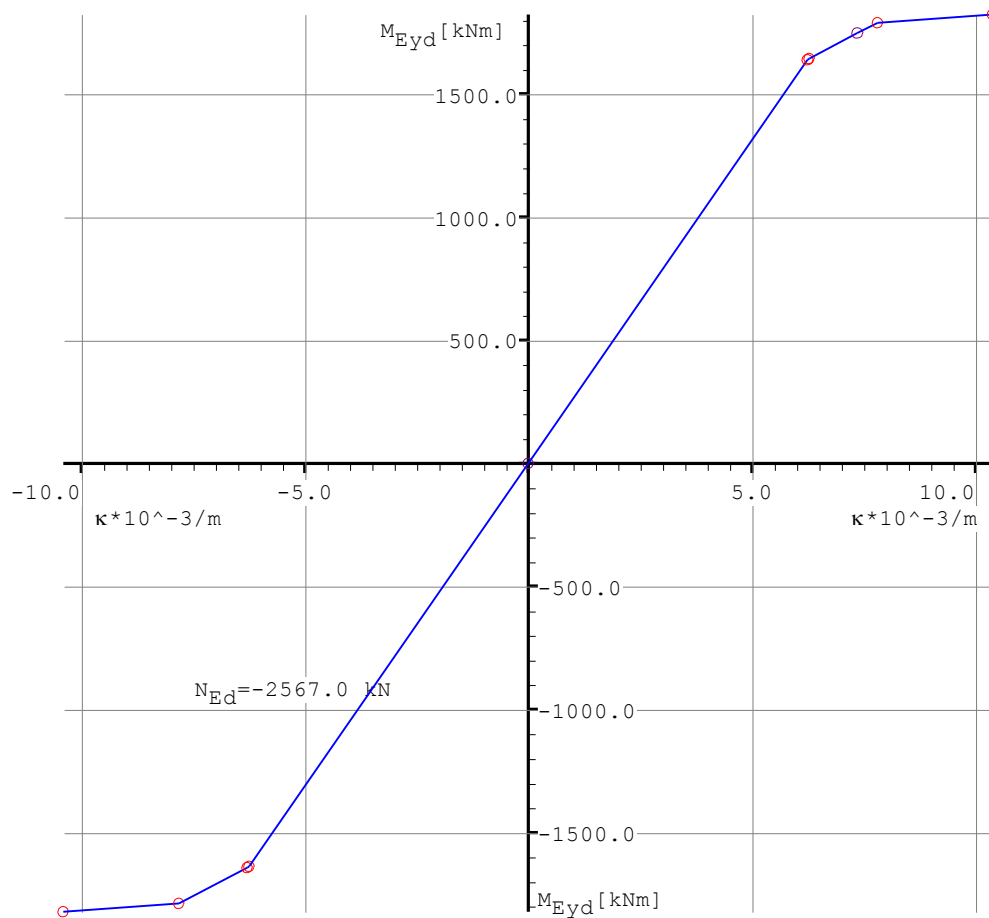
Wapening

nr.	y-coörd. [mm]	z-coörd. [mm]	Diameter [mm]	As/Ap [mm ²]	Perc. [%]	Staalkwaliteit	Voorspanning [N/mm ²]
1	51.0	699.0	32.0	804.2	100	B500A	0.0
2	175.0	699.0	32.0	804.2	100	B500A	0.0
3	299.0	699.0	32.0	804.2	100	B500A	0.0
4	51.0	51.0	32.0	804.2	100	B500A	0.0
5	175.0	51.0	32.0	804.2	100	B500A	0.0
6	299.0	51.0	32.0	804.2	100	B500A	0.0
7	51.0	151.0	32.0	804.2	100	B500A	0.0
8	175.0	151.0	32.0	804.2	100	B500A	0.0
9	299.0	151.0	32.0	804.2	100	B500A	0.0
10	51.0	599.0	32.0	804.2	100	B500A	0.0
11	175.0	599.0	32.0	804.2	100	B500A	0.0
12	299.0	599.0	32.0	804.2	100	B500A	0.0

Invoer Grafisch



MN-Kappa-diagram -Sterkte-



Technosoft MN-Kappa release 6.01

20 mei 2018

Project :
Onderdeel :
Dimensies : kN;m;rad (tenzij anders aangegeven)
Datum : 21/04/2018
Bestand : MNK boog_Ned max.mnk
Referentieperiode: 50 jaar

Toegepaste normen volgens Eurocode met Nederlandse NB

Beton NEN-EN 1992-1-1:2011 (nl) C2/A1:2015 (nl) NB:2016 (nl)

Invoer

Geometrie

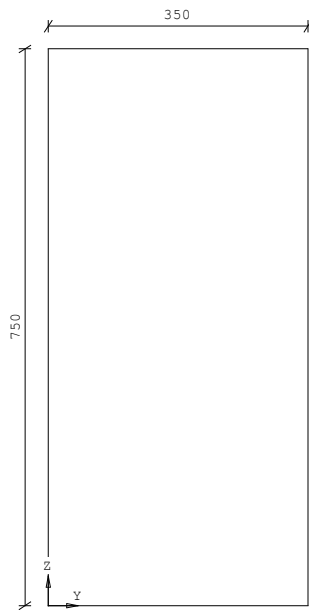
Elementtype : Balk
Scheve buiging : Ja
Treksterkte $f_{ctm,fl}$: Nee
Doorsnede vorm : 0:Rechthoek
Breedte : 350 Hoogte : 750
Betonkwaliteit : C55/67 (kruipfactor=1.49)

Doorsnedegrootheden

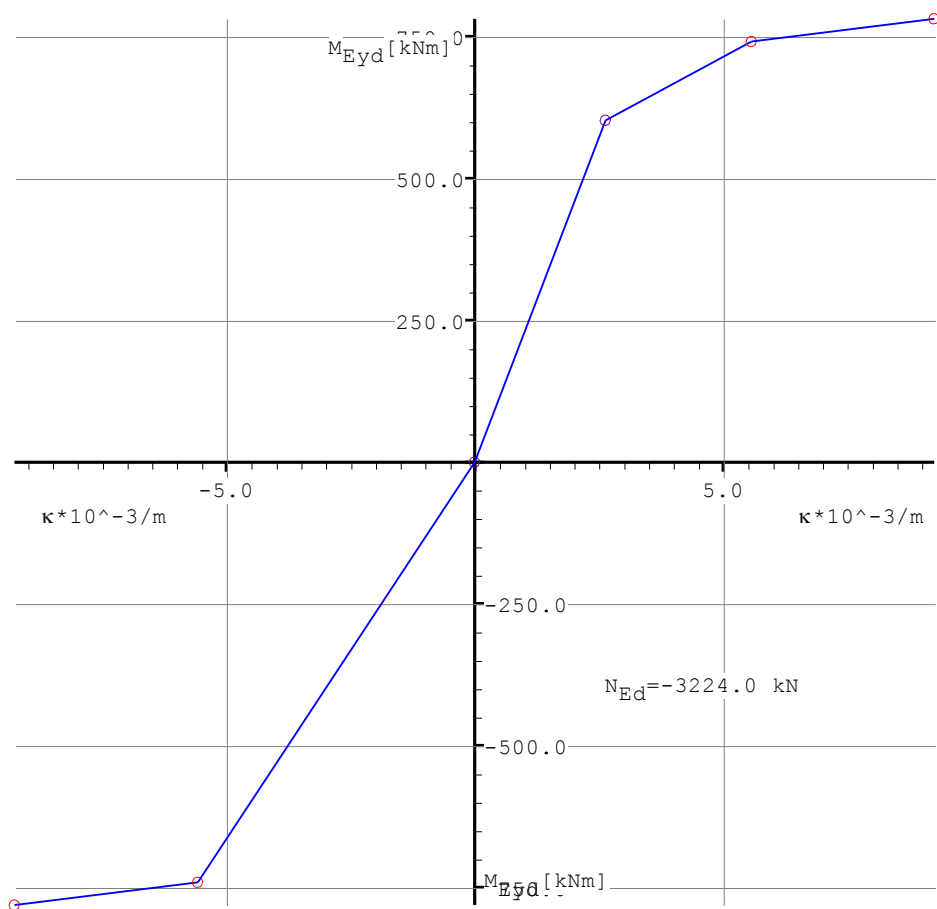
Grootheden exclusief wapening

A_b = 262500 mm^2
 z_z = 375.0 mm y_z = 175.0 mm
 I_y = 12304687500 mm^4 I_z = 2679687500 mm^4

Invoer Grafisch



MN-Kappa-diagram -Sterkte-



Project :
 Onderdeel :
 Dimensies : kN;m;rad (tenzij anders aangegeven)
 Datum : 21/04/2018
 Bestand : C:\Users\mei\Dropbox\Studie\betonvereniging\Jaar 3\
 Afstuderen\Definitieve variant uitwerking\Boog als
 kolom.klw
 Referentieperiode: 50

Toegepaste normen volgens Eurocode met Nederlandse NB

Beton NEN-EN 1992-1-1:2011 (nl) C2/A1:2015 (nl) NB:2016 (nl)

Geometrie

Type constructie : Kolom Rechthoekig Dubbel excentrisch belast
 Kolomafmeting in X/Y (=b*h) [mm] : 400 * 750
 Kolomhoogte (L) [mm] : 5810
 Belastingsschema : Geschoord met dwarsbelasting
 Kniklengtefactor X/Y : 0.70 0.70
 Pendelkolom : Nee

Belasting

	BG1	BG2	BG3	Maatg. BC-X	Maatg.
BC-Y					
Omschrijving belastinggeval					
Normaalkracht N Ek [kN]	3232.00	0.00	0.00	3232.00	3232.00
MEk,X boven [kNm]	1747.00	0.00	0.00	1747.00	1747.00
MEk,X midden [kNm]	-602.00	0.00	0.00	-602.00	-602.00
MEk,X onder [kNm]	305.00	0.00	0.00	305.00	305.00
MEk,Y boven [kNm]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MEk,Y midden [kNm]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MEk,Y onder [kNm]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Belastingfactoren					
BC1 Fundamenteel	1.00	0.00	0.00	Maatgevend	X/Y

Beton en Wapening

Betonkwaliteit : C55/67 Prefab : Nee
 Soort spanningsrekdiagram : Parabolisch - rechthoekig diagram
 Staalsoort : B500A Symm.wapening: 4-zijdig
 f_{yk} [N/mm²] : 500 ϵ_{uk} [%] : 2.5
 Soort spanningsrekdiagram : Bi-lineair diagram met klimmende tak
 Basiswapening [mm] : 4 ø32 Bijlegw.[mm] : ø32, 32
 Beugels [mm] : ø 8
 Factor alpha : 2.00

Betondekking

Milieu : XC1
 Gestort tegen bestaand beton : Nee
 Element met plaatgeometrie : Nee
 Specifieke kwaliteitsbeheersing : Nee
 Oneffen beton oppervlak : Nee
 Ondergrond : Glad / N.v.t.
 Constructieklasse : S3
 Grootste korrel : 31.5

Betondekking

Hoofdwapening	:	2de laag		
Nominale dekking	:	37		
Toegepaste dekking	:	38		
Gelijkwaardige diameter	:	32		
$C_{min,b}$ $C_{min,dur}$ ΔC_{dur}	:	32	10	0
C_{min} ΔC_{dev} C_{nom}	:	32	5	37
Beugel / Verdeelwapening	:	1ste laag		
Nominale dekking	:	15		
Toegepaste dekking	:	30		
Gelijkwaardige diameter	:	8		
$C_{min,b}$ $C_{min,dur}$ ΔC_{dur}	:	8	10	0
C_{min} ΔC_{dev} C_{nom}	:	10	5	15

Maatgevende belastingcombinatie 1: (Fundamenteel)

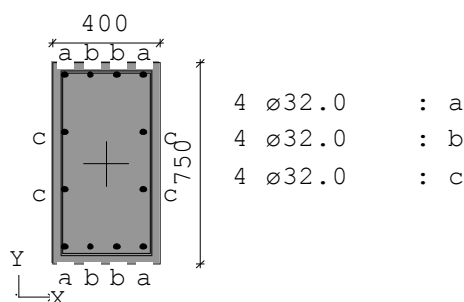
Berekende gegevens

	X-as	Y-as	BC1
Berekend moment $M_{Ed,ber}$ [kNm] :	1765.18	123.25	
Min. wapening art. 9.5.2 (2) [mm ²] :	743.4		
Min. wap. art. 9.5.2 (2) & (4) [mm ²] :	201.1 = 4 $\varnothing$ 8.0		
Min. wap. trekzone 7.3.2 [mm ²] :	0.0		
Totaal ber. wap. 1e/2e orde [mm ²] :	9048.6		
Maatgevende wapening [mm ²] :	9048.6		

Gevonden wapening

	basiswapening	X-as	Y-as
Bijlegcombinatie 1 9651 [mm ²] :	4 $\varnothing$ 32.0	4 $\varnothing$ 32.0	4 $\varnothing$ 32.0

Grafische uitvoer bijlegcombinatie 1



Opmerkingen

- [64] Dubbel-exc. belaste kolom met minstens één zijde momenten nul
- [10] * = Minimum wapening Y-ri.
- [101] De berekende wapening is de totale wapening in de doorsnede.
- [120] In bijlegcomb. 1 Y-ri zijn h.o.h. afstanden aanwezig die groter dan 150 mm zijn. Let op dat voldaan wordt aan detailleringseis conform artikel 9.5.3(6).
- [117] Buiging om de X-as is maatgevend
- [111] Alzijdige wapening vier-zijdig symmetrisch
- [108] Gevonden wapening onverminderd toepassen over gehele kolomhoogte

Bijlage J: Plan van aanpak



Project	: Afstudeeronderzoek
Onderdeel	: Plan van aanpak
Datum	: 05-09-2017
Opleiding	: BVBMS
Student	: Lex Meijer
Student nummer	: 16541
Afstudeerbegeleider	: Ing. J.H.M. Tuinte RO

Inhoudsopgave

1	Inleiding.....	151
2	Project omschrijving	151
2.1	Algemeen	151
2.2	Onderzoeksvraag	152
2.3	Eisen van de opdrachtgever/architect.....	152
2.4	Projectgrenzen en randvoorwaarden	152
3	Opbouw afstudeeronderzoek	153
3.1	Literatuurstudie naar mogelijke varianten	153
3.2	Varianten studies	153
3.3	Uitwerking gekozen variant	154
3.4	Schetsen en toelichting definitieve variant	154
3.5	Conclusies	154
4	Personalia.....	154
5	Termen en afkortingen	155
6	Bibliografie	155
	Bijlage: Planning	155

1 Inleiding

Voor de master opleiding betonconstructeur van de betonvereniging dient een afstudeeronderzoek te worden gemaakt. In het onderzoek dienen met name ontwerpaspecten te worden belicht. Tevens dient de technische kennis die men heeft opgedaan in de opleiding naar voren te komen. De nadruk ligt echter bij het maken van een variantenstudie waaruit blijkt dat men verschillende bouwsystemen kan beoordelen op basis van vooraf gestelde beoordelingscriteria. Hierbij moet men denken aan constructieve haalbaarheid, het programma van eisen van de architect/opdrachtgever, uitvoerbaarheid, kosten en duurzaamheid.

In dit document wordt een project beschreven waarbij verschillende ontwerpen op bovenstaande criteria worden getoetst. Daarnaast zal er een toelichting worden gegeven op de voorlopige opzet van het afstudeerrapport. Hierbij wordt duidelijk welke constructie elementen in een variantenstudie worden opgenomen, welke onderdelen worden gedimensioneerd en welke onderdelen inhoudelijk worden getoetst aan de hand van de Eurocode.

2 Project omschrijving

2.1 Algemeen

Het betreft een ontwerp voor een gebouw aan het Doeleplein te Leeuwarden van “de unie architecten”. Het is een inzending voor de manifestatie Kloppend Hart in Leeuwarden ten behoeve van het revitaliseren van delen van de binnenstad van Leeuwarden.

Op dit moment is het een ongedefinieerde ruimte met enkel een aantal parkeerplekken, dit mist levendigheid. Het ontwerp betreft meer dan enkel een gebouw maar voor dit afstudeeronderzoek worden enkel het hoofdgebouw gebruikt welke is verduidelijkt op onderstaande afbeelding (<http://deuniearchitecten.nl>, 2016).



Figuur 1: Stedenbouwkundige inpassing

Het bouwblok bevat 3 onderdelen. De begane grond en de eerste verdieping zijn beschikbaar voor de Fryske Akademy(school). De “tussenlaag”, ook wel 2^e verdieping, is een opengewerkte verdieping. Deze opengewerkte verdieping kan gebruikt worden als restaurant met dakterrassen. De lagen daarboven worden uitgevoerd als appartementen. De behoefte tot parkeerruimte wordt in het andere blok opgelost en maakt dus geen onderdeel uit van dit afstudeeronderzoek.

2.2 Onderzoeksvraag

Zoals in paragraaf 2.1 beschreven heeft dit project 3 verschillende bestemmingsdoeleinden. Voor deze onderdelen gelden verschillende belastingen, randvoorwaarden en eisen met betrekking tot flexibiliteit. Dit leidt tot een interessant onderzoek voor dit gebouw met de vraagstelling:

- Wat zijn de optimale constructieve voorzieningen voor een maximale flexibiliteit, rekening houdend met de vereiste veiligheid, esthetiek en maatschappelijke randvoorwaarden, bij het stapelen van verschillende gebruiksfuncties voor het project aan het Doeleplein te Leeuwarden?

Deze hoofdvraag zal beantwoord worden middels onderstaande deelvragen:

- Wat is de invloed van de door de opdrachtgever/architect gestelde eisen m.b.t. flexibiliteit van de indeling?
- Wat is de invloed van de vereiste flexibiliteit bij het stapelen van constructies op dragende elementen?
- Wat is de invloed van de vereiste flexibiliteit op het stabiliteitssysteem?

2.3 Eisen van de opdrachtgever/architect

Voordat het ontwerp wordt uitgewerkt volgt er eerst nog een gesprek met de architect van het ontwerp. Het ontwerp maakt onderdeel uit van een manifestatie waarin de architect vrij is gelaten met de invulling van het gebouw. Hierdoor is de architect naast ontwerper, tevens opdrachtgever van het project.

In overleg met de architect wordt een programma van eisen opgesteld. Hierin zullen enkele randvoorwaarden worden vastgesteld als; definitieve afmetingen van de vorm, de mate van flexibiliteit bij de indeling, openheid van de gevels, en het aantal benodigde vierkante meters per ruimte.

2.4 Projectgrenzen en randvoorwaarden

De uitwerking van het project beperkt zich uitsluitend tot de in dit projectplan benoemde onderdelen. Dat wil onder andere zeggen dat het alleen om het hoofdgebouw gaat. Het behelst enkel de hoofdconstructie van het hoofdgebouw. In de uitwerking van dit project wordt geen rekening gehouden met een eventuele parkeergarage of andere gestelde ontwerpvarianten van de architect.

Voor een gedegen vergelijk en een overzichtelijke uitwerking worden op voorhand de materiaaleigenschappen vastgelegd. Dit is met uitzondering van elementen waarbij de kwaliteiten in alle gevallen door de leverancier wordt bepaald. Er wordt gebruik gemaakt van de volgende materialen:

Beton (NEN-EN 1992-1-1 tabel 3.1)

- | | | |
|--|--------|------------------|
| • ter plaatse gestort beton, fundering | C30/37 | milieuklasse XC3 |
| • ter plaatse gestort beton, binnen | C30/37 | milieuklasse XC1 |
| • geprefabriceerde delen casco | C55/67 | milieuklasse XC1 |

Constructiestaal

- | | |
|----------------------------------|------------------|
| • kokers en buisprofielen | S355 warmgewalst |
| • overig staal t.b.v. het skelet | S235 |
| • SFB liggers | S355 |

3 Opbouw afstudeeronderzoek

Voor het onderzoek, zoals beschreven in het voorgaande hoofdstuk, wordt gebruik gemaakt van de hieronder beschreven systematiek. Als vanzelfsprekend wordt beschouwd dat een verslag een voorblad, inhoudsopgave enzovoorts bevat. In dit hoofdstuk worden enkel de bepalende onderdelen voor de opzet van het verslag met betrekking tot het beantwoorden van de hoofd- en deelvragen benoemd.

3.1 Literatuurstudie naar mogelijke varianten

Allereerst wordt er een literatuurstudie uitgevoerd naar de mogelijke varianten welke zijn gegeven in paragraaf 3.2. In deze literatuurstudie worden uitsluitend de vooraf gestelde onderdelen getoetst en wordt niet afgeweken van systematiek zoals weergegeven in dit projectplan. De studie richt zich op:

- Bouwsystemen/hoofddraagstructuur
- Vloersystemen
- Wandsystemen

De onderdelen van deze literatuurstudie worden verder in deze documentatie nader toegelicht. In het hoofdverslag worden de resultaten van de literatuurstudie zeer beknopt weergegeven. De achtergrond van de documentatie wordt opgenomen in de bijlage van het verslag.

Naast een studie naar bouwmaterialen en systemen wordt er ook onderzoek gedaan naar referentieprojecten. Dit onderzoek dient breed te worden geïnterpreteerd waarbij de exacte invulling nog gemaakt moet worden. Er wordt gezocht naar referentie projecten, maar ook dieper onderzoek gedaan naar de toe te passen materialen en bouwsystematieken. Denk hierbij aan interviews en gesprekken met personen uit de praktijk.

3.2 Varianten studies

In deze paragraaf worden de verschillende varianten studies, ook wel multi-criteria-analyse(MCA) genoemd, verder toegelicht. Omdat de tijd waarin het afstudeeronderzoek gemaakt dient te worden beperkt is, worden enkel de door de student belangrijk bevonden onderdelen belicht. Deze onderdelen hebben betrekking op de opleiding en hebben een sterke relatie met zijn werkgebied. In de varianten studies worden korte handberekeningen/analyses gemaakt met betrekking tot: constructieve haalbaarheid, het programma van eisen van de architect/opdrachtgever, uitvoerbaarheid, kosten en duurzaamheid.

- Bouwsystemen:
 - o Beton
 - Prefab
 - In het werk gestort beton
 - Combinatie van prefab en In het werk gestort beton
 - Tunnelbouw
 - o Staal
 - o Combinatie van staal en beton
 - o Staalbeton structuur
- Vloersystemen
 - o Kanaalplaatvloer
 - o Breedplaatvloer
 - o Vlakke plaatvloer
 - Lijnvormig ondersteund
 - Puntvormig ondersteund
 - o Staalplaatbetonvloer

- Combinatievloer
 - Ribbenvloer
 - TT-vloer
 - Bollenvloer
 - Cassettenvloer
 - Vleugelvloer
 - Kokerplaatvloer
- Wand systemen:
 - Prefab
 - i.h.w.g. beton
 - Kalkzandsteen
 - Kolommen+ bouwkundige invulling
- Stabiliteitssysteem:
 - Kern
 - Portalen
 - Dragende gevel elementen die stabiliteit verzorgen
 - Wanden
 - Kruisjes
 - Een combinatie van het bovenstaande

3.3 Uitwerking gekozen variant

Omdat de opleiding en afstudeerrichting zich betreft op betonconstructies wordt voor de uiteindelijke uitwerking gekozen voor een betonvariant onafhankelijk van de uitkomst van de variantenstudie. Het is een afstudeeronderzoek waarbij dient te worden aangetoond dat de kennis die vergaard is in de opleiding in de praktijk gebracht kan worden. In enkele gevallen kan er echter voor een combinatie van staal en beton worden gekozen waar de kennis van betonconstructies toch naar voren komt. Het technische aspect is hierbij het belangrijkste.

Van deze variant worden de volgende onderdelen belicht:

- Schematisering van de hoofddraagconstructie
- Dimensionering van de hoofddraagconstructie
- Detailberekeningen
- Toelichting van knelpunten en aandachtspunten van de variant

3.4 Schetsen en toelichting definitieve variant

In dit hoofdstuk wordt de definitieve keuze geanalyseerd en toegelicht. Hier volgt een beschouwing op de gekozen variant en gecontroleerd of eerder gemaakte aannames, in de variantenstudie, juist zijn. De keuzes van onder andere; bouwsystemen, overspanningen, dimensies en bepalende details worden op schetsmatig niveau gepresenteerd.

3.5 Conclusies

Tot slot wordt het samenvatting van voorgaande hoofdstukken gemaakt. Hierin wordt beknopt beschreven wat de resultaten van het onderzoek zijn. Daarnaast wordt het ontwerptraject geanalyseerd en de juistheid van eerdere aannames beschouwd.

4 Personalia

Naam: Lex Meijer
Adres: Prunusstraat 56
9741LE Groningen
Email: lmeijer@abtwassenaar.nl

Telefoon: 06 - 13 76 19 82
 Studentnr: 16541
 Afstudeerrichting: Beton

5 Termen en afkortingen

MCA = Multi-criteria-analyse

6 Bibliografie

architecten, d. u. (2016). <http://deuniearchitecten.nl>. Opgeroepen op april 2017, van http://deuniearchitecten.nl/assets/documents/klop_39e.pdf

Bijlage: Planning

Activiteit	Duur (in dagen)
Schrijven projectplan/overleg onderzoek	10
Controle en aanvullingen projectplan	2
Literatuuronderzoek	9
Bouwsystemen	3
Vloersystemen	2
Wanden	2
Duurzaamheid	2
Referenties	6
Onderzoek referentieprojecten	3
Verschillende overleggen met architect	1
Overleg met mensen uit de praktijk/locatie bezoek	2
Opstellen MCA's en toelichting	10
Bouwsystemen	3
Vloersystemen	2
Stabiliteitssystemen	3
Funderingstypologie	2
Opstellen ontwerpnotitie	2
Uitwerking varianten	24
Schematiseren van de hoofddraagconstructie	9
Dimensioneren varianten	9
Detailberekeningen	6
Analyseren en toelichten knelpunten	3
Uitschetsen en toelichten gekozen variant	5
Conclusie, reflectie ed.	3
Rapportage definitief maken/controleren	5
Inleveren Afstudeerrapport	1
Totaal aantal dagen	77
Totaal aantal uren	616