

2014•2015
FACULTEIT INDUSTRIËLE INGENIEURSWETENSCHAPPEN
master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Masterproef

Materiaaloptimalisatie bij industriehallen op basis van gecombineerde stabiliteits-, kostprijs- en milieubelastingsanalyses

Promotor :
Prof. dr. ing. Bram VANDOREN

Promotor :
ing. LUC SCHOUTEDEN

Jonas Breemans , Wouter Van Asbroeck

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Gezamenlijke opleiding Universiteit Hasselt en KU Leuven

2014•2015
Faculteit Industriële
ingenieurswetenschappen
master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Masterproef

Materiaaloptimalisatie bij industriehallen op basis van
gecombineerde stabiliteits-, kostprijs- en
milieubelastingsanalyses

Promotor :
Prof. dr. ing. Bram VANDOREN

Promotor :
ing. LUC SCHOUTEDEN

Jonas Breemans , Wouter Van Asbroeck
*Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële
wetenschappen: bouwkunde*

Woord vooraf

Deze masterproef vormt het sluitstuk van onze masteropleiding in de industriële ingenieurswetenschappen met als afstudeerrichting bouwkunde. De keuze voor dit onderwerp heeft enerzijds te maken met onze grote interesse in de industriebouw. Anderzijds hopen we dat het geleverde resultaat een aanwinst kan zijn voor zowel de toekomstige klanten die een industriehal willen bouwen als voor studiebureau V2S waaraan deze masterproef verbonden is.

Vooreerst willen we onze interne promotor prof. dr. ing. Bram Vandoren bedanken. Dankzij de masterseminaries hebben we een veel kennis vergaard met betrekking tot het schrijven van deze thesis. Doorheen het jaar konden we ook altijd bij hem terecht met de problemen die we tijdens ons onderzoek ondervonden hebben.

Onze externe promotor ing. Luc Schouteden van studiebureau V2S willen we eveneens bedanken voor zijn invloed op deze masterproef. We konden hem altijd contacteren wanneer we vragen hadden. V2S stelde ook altijd de vergaderruimte ter beschikking voor ons zodat we hier verder konden werken. Ook zijn we Tom Vertessen, ingenieur bij V2S zeer dankbaar omdat hij de tweede contactpersoon was bij het bedrijf. De controles van onze rekenbestanden werden door hem altijd uitgevoerd waardoor we er zeker van waren dat er geen fouten in de berekening stonden.

Tot slot willen we onze familie en vrienden bedanken voor de steun en aanmoedigen gedurende de opleiding en deze masterproef. Dankzij hun vonden we telkens de kracht om door te zetten. We wensen jullie veel plezier bij het lezen van dit eindwerk.



Inhoudsopgave

Woord vooraf	1
Tabellenlijst	5
Figurenlijst.....	7
Symbolenlijst	9
Abstract	11
Abstract in English	13
1 Inleiding	15
2 Literatuurstudie	17
2.1 Stabiliteit	17
2.2 Houten constructies	19
2.3 Geprefabriceerd beton	20
2.4 Levenscyclusanalyse	22
2.5 Brandveiligheid	23
2.5.1 Brandweerstand	23
2.5.2 Verhogen brandweerstand	24
3 Standaard industriehal.....	25
3.1 Afmetingen.....	25
3.2 Belastingen.....	26
3.2.1 Eigengewicht.....	27
3.2.2 Dakbelasting	27
3.2.3 Nuttige last daken.....	27
3.2.4 Windbelasting.....	28
3.2.5 Sneeuwbelasting.....	29
3.3 Knikverschijnsel	29
3.4 Staalconstructie	32
3.4.1 Ontwerp	32
3.4.2 Resultaten	35
3.4.3 Fundering	41
3.4.4 Prijsbepaling	44
3.5 Betonstructuur met houten gelamelleerde liggers	46
3.5.1 Ontwerp	46
3.5.2 Resultaten	47
3.5.3 Fundering	56
3.5.4 Prijsbepaling	56

3.6 Geprefabriceerde betonstructuur	58
3.6.1 Ontwerp	58
3.6.2 Resultaten	62
3.6.3 Fundering	67
3.6.4 Prijsbepaling	67
3.7 Prijsvergelijking	68
4 Industriehal met variabele overspanning	71
4.1 Ontwerp	71
4.2 Staalstructuur	72
4.2.1 Keuze oriëntatie profielen	73
4.2.2 Prijsbepaling	75
4.3 Betonstructuur met houten gelamelleerde liggers	79
4.3.1 Ontwerp	79
4.3.2 Prijsbepaling	79
4.4 Geprefabriceerde betonstructuur	83
4.4.1 Ontwerp	83
4.4.2 Prijsbepaling	83
4.5 Prijsvergelijking	86
4.5.1 Zone A	87
4.5.2 Zone B	88
4.5.3 Zone C	88
4.5.4 Kostprijs per vierkante meter	89
5 Levenscyclusanalyse	93
5.1 Definitie van doel en reikwijdte	93
5.2 Analyse van de levenscyclusinventaris	94
5.2.1 Industriehal staal	94
5.2.2 Betonstructuur met houten gelamelleerde liggers	95
5.2.3 Geprefabriceerde betonstructuur	95
5.3 Berekening van de impact over de hele levenscyclus	96
5.4 Interpretatie van impact van de levenscyclus	96
6 Algemeen resultaat	99
Besluit	101
Bibliografie	103
Bijlagen	105

Tabellenlijst

Tabel 1: Grenstoestanden [2]	17
Tabel 2: Partiële veiligheidsfactoren [2].....	18
Tabel 3: Huidige brandweerstandletters [8]	23
Tabel 4: Afmetingen standaard industriehal	26
Tabel 5: Terreincategorieën [12]	28
Tabel 6: Profielen staal.....	34
Tabel 7: Berekening funderingszool	44
Tabel 8: Prijsbepaling staalstructuur	45
Tabel 9: Prijsbepaling betonstructuur met houten gelamelleerde liggers ...	57
Tabel 10: Mogelijke overspanningen geprefabriceerde liggers [17].....	58
Tabel 11: Profiel betonnen elementen	61
Tabel 12: Prijsbepaling geprefabriceerde betonstructuur.....	68
Tabel 13: Prijsvergelijking standaardhal	69
Tabel 14: Profielen staal bij variabele overspanning	72
Tabel 15: Prijsbepaling van stalen constructie bij variabele overspanning .	76
Tabel 16: Kostprijs per vierkante meter van staalconstructie bij variabele overspanning	77
Tabel 17: Afmetingen van gelamelleerde houten liggers bij variabele overspanning	79
Tabel 18: Prijsbepaling betonstructuur met houten gelamelleerde liggers bij variabele overspanning.....	80
Tabel 19: Kostprijs per vierkante meter van betonstructuur met houten gelamelleerde liggers bij variabele overspanning	81
Tabel 20: Afmetingen elementen van geprefabriceerde betonconstructie bij variabele overspanningen	83
Tabel 21: Prijsbepaling geprefabriceerde betonstructuur bij variabele overspanningen.....	84
Tabel 22: Kostprijs per vierkante meter van geprefabriceerde betonstructuur bij variabele overspanning	85
Tabel 23: Prijsvergelijking tussen de verschillende industriehallen	86
Tabel 24: Aanpassingen constructie bij verhoging van de overspanning van 16 naar 20 meter	88
Tabel 25: Aanpassingen constructie bij verhoging van de overspanning van 28 naar 30 meter	89
Tabel 26: Vergelijking kostprijs per vierkante meter tussen de verschillende industriehallen.....	90
Tabel 27: Totale CO2-uitstoot voor verschillende industriehallen.....	97
Tabel 28: Meest optimale materiaal per zone	99

Figurenlijst

Figuur 1: Opbouw masterproef	16
Figuur 2: Kniklengtes [3]	18
Figuur 3: Halvering kniklengte	19
Figuur 4: Industriehal met zadeldakliggers [4]	20
Figuur 5: Ligger-kolom verbinding prefab beton [5]	21
Figuur 6: Consoles prefab beton [6]	21
Figuur 7: Levenscyclusanalyse fases [7]	22
Figuur 8: Ontwerp parameters	26
Figuur 9: Dakbelasting [11]	27
Figuur 10: ANB: Basiswindsnelheden bepaald per gebied	28
Figuur 11: Karakteristieke waarde van sneeuwbelasting [13]	29
Figuur 12: Definiëring van de kniklengtes volgens de y-as in de industriehal met vollewandliggers	30
Figuur 13: Definiëring van de kniklengtes volgens de z-as in de industriehal met vollewandliggers	31
Figuur 14: Definiëring van de kniklengtes volgens de y-as in de industriehal met vakwerkliggers	31
Figuur 15: Definiëring van de kniklengtes volgens de z-as in de industriehal met vakwerkliggers	32
Figuur 16: Ontwerp industriehal staal	33
Figuur 17: Kniestukken	34
Figuur 18: Vrijheidsgraden drukkokers, tussen -en hoekkolommen	35
Figuur 19: Resultaat sterktecontrole van de staalconstructie	37
Figuur 20: Staaltoets volgens EN1993-1-1	38
Figuur 21: Verbinding windverbanden	39
Figuur 22: Resultaat stabiliteitscontrole van de staalconstructie	40
Figuur 23: Funderingszool	41
Figuur 24: Mobiele belasting [15]	42
Figuur 25: In te rekenen grondpakket en gebruiksbelasting	43
Figuur 26: Derix zadeldakligger met rechte onderzijde [4]	46
Figuur 27: Ontwerp zadeldakligger	46
Figuur 28: Ontwerp betonstructuur met houten gelamelleerde liggers	47
Figuur 29: Resultaat sterktecontrole van de beton-houtconstructie	48
Figuur 30: Resultaat stabiliteitscontrole van de beton-houtconstructie	50
Figuur 31: Resultaat langswapening evenwijdig met lokale y-as van de beton-houtconstructie	52
Figuur 32: Resultaat langswapening evenwijdig met lokale z-as van de beton-houtconstructie	53
Figuur 33: Resultaat dwarswapening evenwijdig met lokale z-as van de beton-houtconstructie	54
Figuur 34: Resultaat dwarswapening evenwijdig met lokale y-as van de beton-houtconstructie	55
Figuur 35: Voorgespannen IV-liggers in geprefabriceerd beton [5]	58
Figuur 36: Toevoeging nieuw materiaal "voorgespannen beton" in de materiaal bibliotheek van Diamonds	59
Figuur 37: Doorsnede IV-ligger	59

Figuur 38: Doorsnede IV-ligger in Diamonds	60
Figuur 39: Stortlaag beton op liggers [18]	60
Figuur 40: Doorsnede en afmetingen van betonnen dakgordingen [5]	61
Figuur 41: Ontwerp geprefabriceerde betonstructuur	62
Figuur 42: Resultaat langswapening evenwijdig met lokale y-as van de geprefabriceerde betonconstructie	63
Figuur 43: Resultaat langswapening evenwijdig met lokale z-as van de geprefabriceerde betonconstructie	64
Figuur 44: Resultaat dwarswapening evenwijdig met lokale z-as van de geprefabriceerde betonconstructie	65
Figuur 45: Resultaat dwarswapening evenwijdig met lokale y-as van de geprefabriceerde betonconstructie	66
Figuur 46: Kostprijs voor verschillende standaard industriehallen	69
Figuur 47: Vakwerkstructuur	73
Figuur 48: IPE 450 normaal	73
Figuur 49: IPE 450 gedraaid	74
Figuur 50: SHS 150*150*10 met sandwichpaneel	74
Figuur 51: UPN profiel gedraaid	74
Figuur 52: Vergelijking industriehal met vollewandliggers en industriehal met vakwerkliggers.....	75
Figuur 53: Prijs in functie van overspanning bij staalstructuur	77
Figuur 54: Prijs per vierkante meter bij staalstructuur	78
Figuur 55: Prijs in functie van overspanning bij betonstructuur met houten gelamelleerde liggers	81
Figuur 56: Prijs/m ² in functie van overspanning bij betonstructuur met houten gelamelleerde liggers.....	82
Figuur 57: Kostprijs in functie van overspanning bij betonstructuur met houten gelamelleerde liggers.....	84
Figuur 58: Prijs/m ² in functie van overspanning bij geprefabriceerde betonstructuur	85
Figuur 59: Prijsvergelijking tussen de verschillende industriehallen	87
Figuur 60: Vergelijking kostprijs per vierkante meter tussen verschillende industriehallen.....	91
Figuur 61: LCA Framework [19].....	93
Figuur 62: Levenscyclus staalstructuur	94
Figuur 63: Levenscyclus betonconstructie met houten gelamelleerde liggers	95
Figuur 64: Levenscyclus geprefabriceerde betonstructuur	96
Figuur 65: CO ₂ -uitstoot voor verschillende standaard industriehallen	97
Figuur 66: CO ₂ -uitstoot in functie van overspanning	98
Figuur 67: Kostprijs en CO ₂ -uitstoot in functie van overspanning	100

Symbolenlijst

Symbol	Verklaring	Eenheid
γ_G	Partiële veiligheidsfactor met betrekking tot eigengewicht	[/]
γ_G	Partiële veiligheidsfactor met betrekking tot mobiele belasting	[/]
γ_P	Partiële veiligheidsfactor met betrekking tot permanente belasting	[/]
l_0	Kniklengte	[m]
s_k	Waarde van de sneeuwbelasting	[kN/m ²]
A_{sk}	Hoogte waar industriehal zich bevindt	[m]
N_{Ed}	Rekenwaarde van de normaalkracht in UGT	[kN]
$M_{y',Ed}$	Rekenwaarde van het buigend moment in y-richting in UGT	[kNm]
$M_{z',Ed}$	Rekenwaarde van het buigend moment in z-richting in UGT	[kNm]
$V_{y',Ed}$	Rekenwaarde van dwarskracht in y-richting in UGT	[kN]
$V_{z',Ed}$	Rekenwaarde van dwarskracht in z-richting in UGT	[kN]
T_{Ed}	Rekenwaarde van het torsiemoment in UGT	[kNm]
$N_{t,Rd}$	Rekenwaarde van de weerstandbiedende trekkracht in UGT	[kN]
$N_{c,Rd}$	Rekenwaarde van de weerstandbiedende drukkracht in UGT	[kN]
$M_{y',Rd}$	Rekenwaarde van het weerstandbiedend moment in y-richting in UGT	[kNm]
$M_{z',Rd}$	Rekenwaarde van het weerstandbiedend moment in z-richting in UGT	[kNm]
$V_{y',Rd}$	Rekenwaarde van de weerstandbiedende dwarskracht in y-richting in UGT	[kN]
$V_{z',Rd}$	Rekenwaarde van de weerstandbiedende dwarskracht in z-richting in UGT	[kN]
T_{Rd}	Rekenwaarde van het weerstandbiedend torsiemoment in UGT	[kNm]
A	Oppervlakte sectiedoorsnede	[mm ²]
f_{yd}	Rekenwaarde van de vloeigrens van de wapening	[N/mm ²]
$W_{y',pl}$	Plastische weerstand in y-richting tegen buiging	[mm ³]
$W_{z',pl}$	Plastische weerstand in z-richting tegen buiging	[mm ³]
A_{vy}	Sectie dwarskrachtwapening in y-richting	[mm ²]

A_{vz}	Sectie dwarskrachtwapening in z-richting	[mm ²]
T_{wm}	Weerstand tegen torsiemoment	[mm ³]
$N_{b,y',Rd}$	Buigingsknikweerstand om sterke as	[kN]
$N_{b,z',Rd}$	Buigingsknikweerstand om zwakke as	[kN]
$N_{b,t,Rd}$	Torsieknikweerstand	[kN]
$M_{b,Rd}$	Laterale torsieknikweerstand	[kNm]
$\chi_{y'}$	Reductiefactor voor knik in sterke richting	[/]
$\chi_{z'}$	Reductiefactor voor knik in sterke richting	[/]
χ_T	Reductiefactor voor knik met betrekking tot torsie	[/]
χ_{LT}	Reductiefactor voor knik op lange termijn	[/]
R	Reactiekracht op fundering	[kN]
q'_{ad}	Toelaatbare funderingsdruk	[kg/cm ²]

Abstract

Studiebureau V2S te Genk krijgt regelmatig de vraag welk bouw materiaal het beste is om een industriehal te realiseren. Terwijl voor het studiebureau uiteraard het stabiliteitsaspect primeert, is vanuit het standpunt van de bouwheer vooral het financiële aspect van belang. Meer en meer wordt echter ook duurzaamheid bij het bouwproces betrokken, met andere woorden wordt belang gehecht aan de milieubelasting van een gebouw.

In deze masterproef zullen deze drie aspecten onderzocht worden. Om dit te onderzoeken werden de drie types industriehallen behandeld die bij V2S het meest frequent voorkomen: staalstructuur, geprefabriceerde betonstructuur en combinatie van betonnen kolommen en houten gelamelleerde liggers. Vooreerst werd de stabiliteit van de verschillende hallen nagegaan met behulp van het analyseprogramma *Diamonds* van *Buildsoft*, dit telkens voor verschillende materialen en overspanningen. Met de bekomen gegevens werd een prijsberekening gemaakt op basis van verschillende aannemersprijzen. Tenslotte werd de levenscyclus en milieu impact van de verschillende materialen geanalyseerd met behulp van het softwarepakket *GaBi*.

Dit onderzoek toont aan dat bij bepaalde overspanningen het beter is om van de traditionele staalstructuur af te stappen, zeker op het vlak van milieu-impact. Met behulp van de levenscyclusanalyse kan in de schemerzone, waar de prijzen dicht bij elkaar liggen, bepaald worden welke structuur uiteindelijk de voorkeur geniet.

Abstract in English

The design office V2S at Genk often receives the question which building material is the best to develop industrial buildings. While the stability aspect prevails for the design office, the financial aspect is from the point of view of the client of more importance. However, sustainability is also increasingly involved in the building process, in other words more importance is attached to the environmental impact of a building.

This master's thesis researches these three aspects. In order to research this, the three types of industrial buildings which occurs the most frequent at V2S were examined: steel structure, prefabricated concrete structure and combination of concrete columns and laminated beams. First of all, the stability of the different industrial buildings was examined using the analysis program Diamonds by Buildsoft. This will be repeated for different materials and spans. With the obtained data a price calculation was made based on different contractors prices. Finally, the life cycle and environmental impact of the different materials were analyzed using the software package GaBi.

This research verifies that at certain spans it is better to abandon the traditional steel structure, especially in terms of environmental impact. At the grey area, where the prices are close together, the life cycle analysis can be used to determine which structure is eventually preferred.

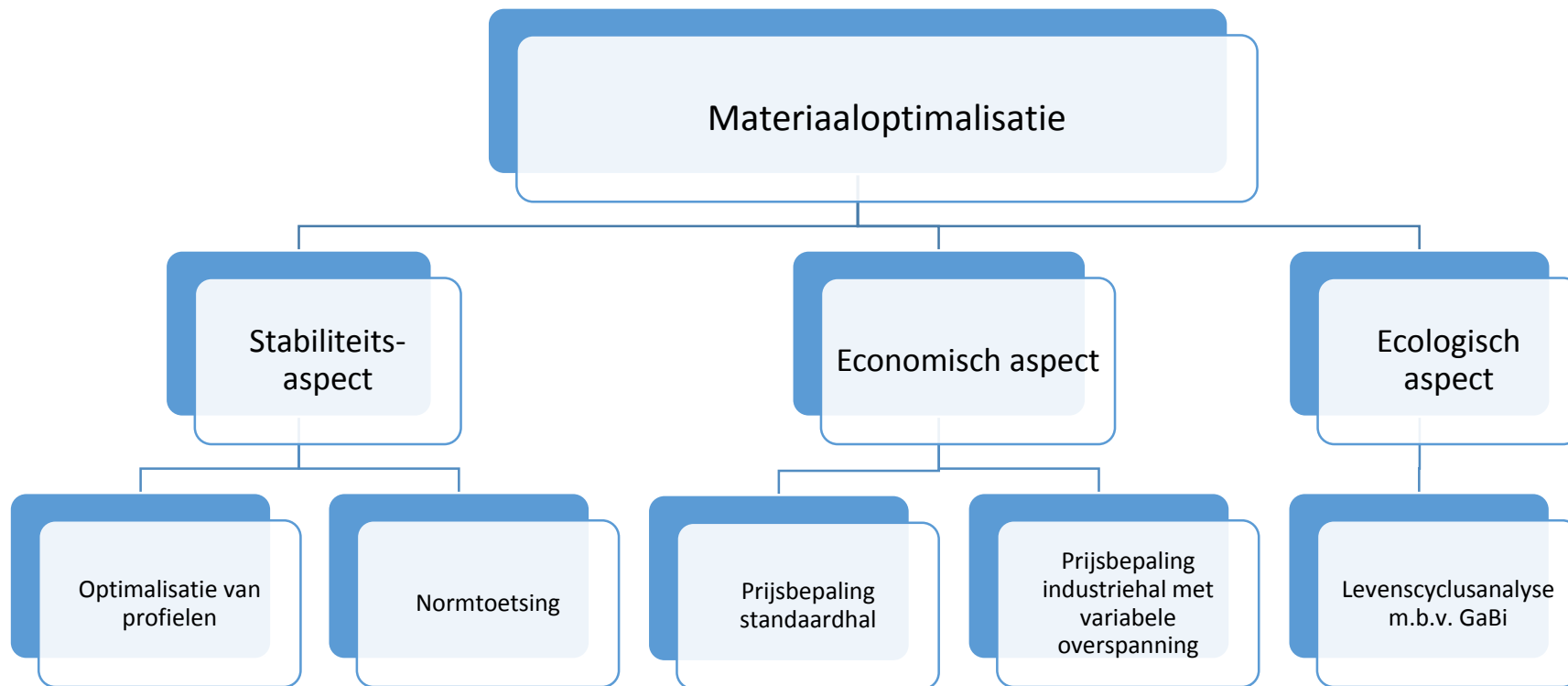
1 Inleiding

Deze masterproef wordt gevormd door een samenwerking met bouwkundig studiebureau V2S bvba. Dit studiebureau houdt zich voornamelijk bezig met de berekening van de stabiliteit van nieuwbouw en renovatie van woningen, appartementen en industriegebouwen. Bij ieder project wordt telkens rekening gehouden met het architecturaal ontwerp, budgettaire belangen en de uitvoeringsmogelijkheden. [1]

Een industriehal kan opgebouwd zijn uit verschillende materialen zoals staal, gelamelleerd hout en beton of geprefabriceerd beton. Het probleem dat hieruit volgt is dat er toepassingsgericht nog niet voldoende onderzoek gedaan is naar het meest optimale materiaal op basis van het financiële en ecologische aspect. Wanneer er niet gekozen wordt voor het meest optimale materiaal, bestaat de kans dat de klant een te hoge prijs moet betalen.

Het doel van dit onderzoek is het bekomen van enkele grafieken waarop het meest optimale materiaal afgelezen kan worden. De kostprijs van de verschillende industriehallen zal berekend worden in functie van de overspanning. Hiervoor wordt eerst met het analyseprogramma *Diamonds* de sectiedoorsneden van de verschillende profielen bepaald. Na een optimalisatie van deze profielen kan de totale kostprijs van de structuur bepaald worden rekening houdende met de gemiddelde prijs van een aantal gerenommeerde aannemers.

Als eerste is er een literatuurstudie uitgevoerd met betrekking tot de algemene stabiliteit van een industriehal en de voor-en nadelen van de verschillende materialen. Vervolgens is een standaard industriehal berekend met vaste afmetingen en overspanning. Na de prijsbepaling van deze hal zal voor ieder materiaal de overspanning variëren waardoor de kostprijs eveneens gaat veranderen. Ten slotte wordt er nog een levenscyclusanalyse uitgevoerd met het softwarepakket *GaBi* waaruit de milieu-impact van de verschillende industriehallen besproken wordt. Dit is samengevat in figuur 1.



Figuur 1: Opbouw masterproef

2 Literatuurstudie

2.1 Stabiliteit

De stabiliteit van een industriehal wordt geleverd door de dragende constructie. Deze constructie moet een grotere weerstand bieden dan de optredende belastingen ten gevolge van eigengewicht, wind, sneeuw en onderhoudsbelasting. Is dit niet het geval, dan treden er aanzienlijke vervormingen op en bestaat er een kans op instorting. De nodige weerstand van de constructie wordt bepaald met behulp van twee grenstoestanden, enerzijds de uiterste grenstoestand (UGT) en anderzijds de bruikbaarheidsgrenstoestand (GGT).

De uiterste grenstoestand heeft betrekking op het instorten of bezwijken van een constructie en wordt onderverdeeld in drie ontwerpsituaties. De tijdelijke ontwerpsituatie UGT-T, de blijvende ontwerpsituatie UGT-B en de accidentele ontwerpsituatie UGT-A.

De bruikbaarheidsgrenstoestand stemt overeen met de voorwaarden die niet meer voldoen aan de bijhorende voorgeschreven gebruikseisen van een constructie. Deze grenstoestand wordt onderverdeeld in vier categorieën: de karakteristieke (GGT-K), zeldzame (GGT-Z), frequente (GGT-F) en quasi-blijvende gebruiksgrenstoestand (GGT-Q).

Tabel 1 geeft een overzicht van de verschillende grenstoestanden.

Tabel 1: Grenstoestanden [2]

Grenstoestanden			
Bezwijkgrenstoestand	UGT	Gebruiksgrenstoestand	GGT
Blijvende ontwerpsituatie	UGT-B	Karakteristiek	GGT-K
Tijdelijke ontwerpsituatie	UGT-T	Zeldzaam	GGT-Z
Accidentele ontwerpsituatie	UGT-A	Frequent	GGT-F
		Quasi-blijvende	GGT-Q

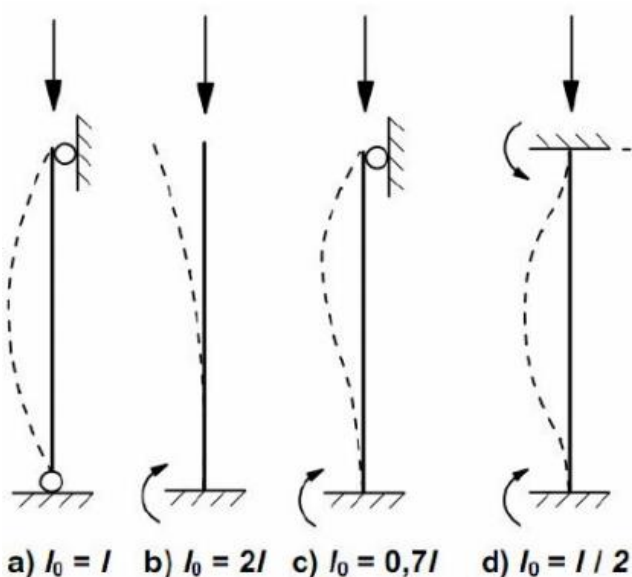
De onderverdeling van de verschillende grenstoestanden is gemaakt zodat er verschillende berekeningen uitgevoerd kunnen worden. Iedere grenstoestand heeft andere partiële veiligheidsfactoren. Deze factoren bepalen hoeveel invloed een belasting heeft op de structuur. Tabel 2 toont de verschillende partiële veiligheidsfactoren voor iedere grenstoestand. γ_G is de veiligheidsfactor met betrekking tot het eigengewicht. De belasting van het eigengewicht zal dus in het geval van UGT-B met 1.35 vermenigvuldigd moeten worden. γ_Q en γ_P hebben invloed op de mobiele belasting en de permanente belasting die op de structuur aangrijpen.

Tabel 2: Partiële veiligheidsfactoren [2]

	UGT-B/T	UGT-A	GGT
γ_G	1.35	1.00	1.00
γ_Q	1.50	1.00	1.00
γ_P	1.00	1.00	1.00

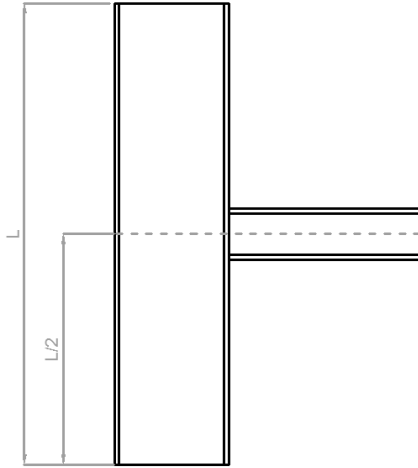
Een van de meest belangrijke stabiliteitsproblemen is het knikverschijnsel. Aangezien er in dit onderzoek steeds knikcontroles uitgevoerd worden, wordt het knikverschijnsel hier uitgelegd.

Knik is het bezwijken ten gevolge van instabiliteit van een element of constructie onder centrische axiale druk en zonder dwarsbelasting. De belasting waarbij knik optreedt, wordt de knikbelasting genoemd. Een belangrijke factor in het beperken van het knikprobleem is het inperken van de kniklengte. De kniklengte l_0 is de afstand tussen twee doorsneden waarvan het moment gelijk is aan nul. Deze is afhankelijk van de randvoorwaarden aan de uiteinden van het element. Als een element aan beide kanten scharnierend is opgelegd, is de kniklengte gelijk aan de volledige lengte van dit element. Bij een inklemming of vrije oplegging zijn er andere kniklengtes zoals te zien in figuur 2.



Figuur 2: Kniklengtes [3]

Een constructie-element heeft meestal een sterke en een zwakke as. Dit houdt in dat het traagheidsmoment volgens de sterke as groter is dan dit van de zwakke as. Een vierkante koker is volledig symmetrisch en zal dus geen sterke of zwakke as hebben. Als een ligger of kolom gesteund wordt langs één richting, moet de kniklengte bij de berekening in deze richting beperkt worden. De staven die de kniklengte beperken worden knikverkorters genoemd. Op deze manier is het mogelijk om grotere overspanningen te realiseren. Figuur 3 toont hoe de kniklengte gehalveerd wordt wanneer er in het midden van een profiel een drukkoker voorzien is.



Figuur 3: Halvering kniklengte

2.2 Houten constructies

Wanneer hout als constructiemateriaal gebruikt wordt, moet de geldende regelgeving NBN EN 1995 -1-1 Eurocode 5: Ontwerp en berekening van houtconstructies in acht genomen worden. Hout kan worden onderverdeeld in verschillende soorten: gezaagd hout, gelijmd gelamelleerd hout, gelamelleerd finer hout (LVL), enzovoort. In dit onderzoek wordt hout uitsluitend gebruikt voor de liggers, die vervaardigd zijn uit gelijmd gelamelleerd hout. Deze houtsoort is opgebouwd uit een aantal lamellen die met elkaar verlijmd worden. Deze techniek maakt grote overspanningen mogelijk, dat uitermate geschikt is voor industriële gebouwen. Deze houtsoort heeft nog andere voordelen. Enkele voorbeelden hiervan zijn de zeer goede brandwerende eigenschappen, een goede prijs/kwaliteit verhouding, een minimaal eigengewicht met een groot draagvermogen en het hout vraagt geen onderhoud.

Gelijmd gelamelleerd hout wordt toegepast in verscheidene soorten dakconstructies zoals zadeldakliggers met rechte onderzijde, zadeldakliggers met gebogen onderzijde, driescharnierspanten, gebogen liggers, doorlopende liggers enzovoort. Figuur 4 toont een voorbeeld van een industriehal met zadeldakliggers. De maximale overspanning bij een zadeldakligger met rechte onderzijde bedraagt 50 meter. Om optimaal te functioneren moet de onderlinge tussenafstand tussen de verschillende liggers tussen 5 en 7 meter liggen. Deze tussenafstanden zorgen ook voor een realistische dakopbouw: er kan gekozen worden voor een standaard type geprofileerde dakplaten. [4]



Figuur 4: Industriehal met zadeldakliggers [4]

2.3 Geprefabriceerd beton

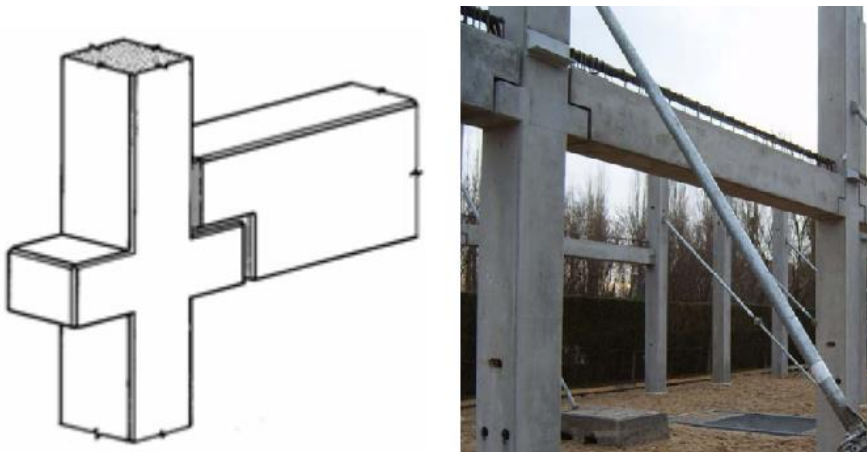
Tegenwoordig neemt het gebruik van geprefabriceerd beton toe. Geprefabriceerd beton biedt dan ook verschillende voordelen. Deze zijn bijvoorbeeld een uitstekende kwaliteit, het optimale gebruik van grondstoffen en mogelijkheden tot goede architectuur. In een fabriek kan een veel hogere verdichtingsgraad gerealiseerd worden. Eveneens is er een betere procesbeheersing en kwaliteitscontrole mogelijk. Doordat prefab fabrieken computergestuurde doseer- en menguitrustingen hebben worden de hulpstoffen en toeslagstoffen zeer optimaal gebruikt zodat verschillende specifieke toepassingen tot de mogelijkheden behoren.

Op de bouwplaats is er een opmerkelijk snellere bouwtijd. Ten eerste moet er in situ geen bekisting worden voorzien zoals het geval is bij traditioneel gestort beton. Ten tweede kan de constructie snel opgebouwd worden, doordat de verbindingen eenvoudig uit te voeren zijn. In figuur 5 is een mogelijke ligger-kolom verbinding weergegeven. Hierbij wordt de ligger voorzien van enkele opgiethulzen en de kolom van enkele wapeningsstaven. Op de werf worden deze twee elementen over elkaar geplaatst waarna via de opgiethulzen in de ligger de verbinding aangestort wordt met beton. Op deze manier ontstaat een scharnierende verbinding die de horizontale belasting kan opvangen.



Figuur 5: Ligger-kolom verbinding prefab beton [5]

Een andere, veel gebruikte, mogelijkheid tot verbinden is het gebruik van consoles. Figuur 6 geeft een rechthoekige console weer waarop een ligger aansluit. Bij een console moet er specifiek rekening gehouden worden met de verticale dwarskracht in de console en de balk. Als deze dwarskracht te groot wordt kan er een afschuivingsprobleem ontstaan.



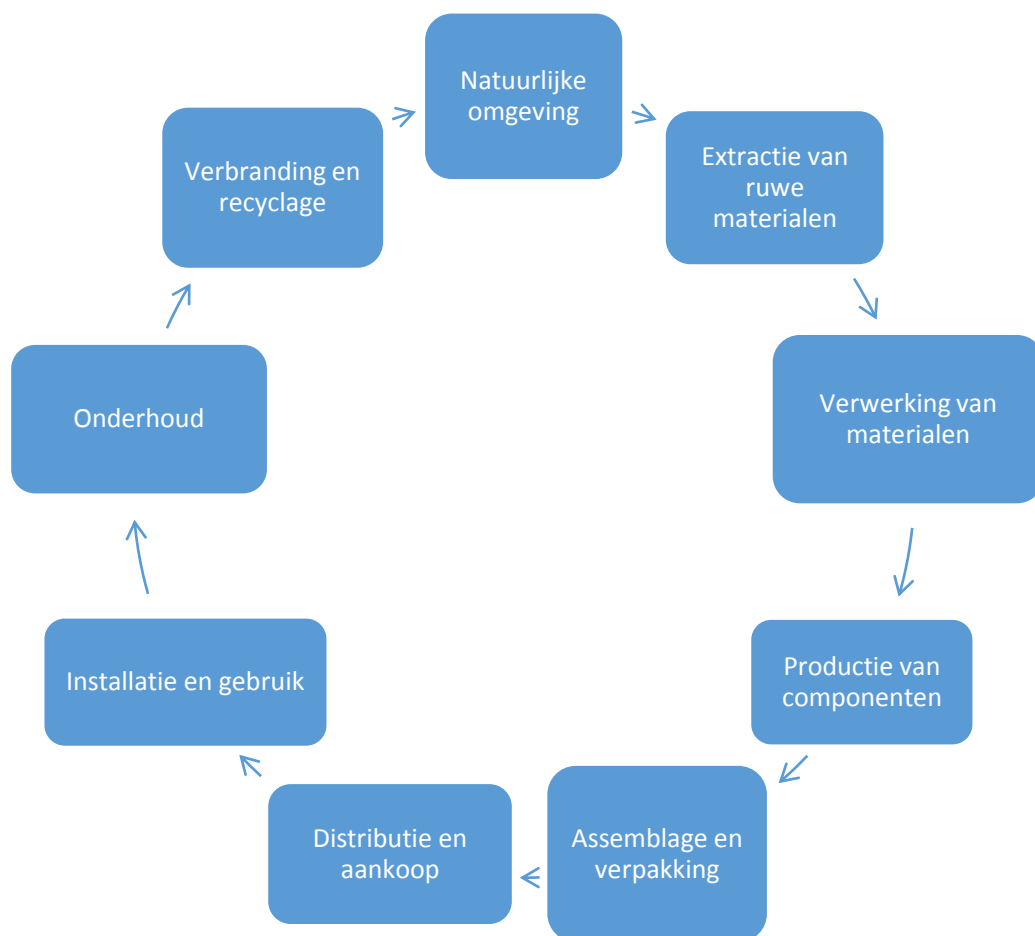
Figuur 6: Consoles prefab beton [6]

Het bouwen met geprefabriceerd beton is milieuvriendelijk. Door de optimale procesbeheersing wordt er tot 45% minder materiaal verbruikt. Bovendien kunnen installaties zoals water –of afvoerleidingen, vloerverwarming, enzovoort in de verschillende elementen geïntegreerd worden. Belangrijk hierbij is dat deze reeds vroeg in de ontwerpfase vastliggen. Zo kunnen alle betrokken partijen hiermee rekening houden.

Een groot nadeel van geprefabriceerd beton is de grotere kostprijs dan deze van traditioneel beton. Deze kostprijs kan terugverdiend worden in het bouwproces, door de mogelijkheid tot snellere verwerking. De afmetingen van de verschillende prefab elementen zijn echter beperkt door de transportmogelijkheden. Hierdoor wordt er frequent gewerkt met vaste maateenheden. Dit kan soms ook als nadeel worden ervaren omdat de architecturale vrijheid hierdoor enigszins beperkt wordt.

2.4 Levenscyclusanalyse

Meer en meer is het voor ontwerpers belangrijk om constructies zo duurzaam mogelijk te ontwerpen. De milieu-impact 'MI' zal beperkt moeten blijven. Om dit te kwantificeren wordt er gebruik gemaakt van een levenscyclusanalyse (LCA). Bij een LCA zal de milieu-impact van de gehele levensduur van een product berekend worden. Dit houdt in dat de productie, installatie, gebruik en de levenseindefase zo duurzaam mogelijk moeten zijn. De productie gaat van het verkrijgen van de grondstoffen tot het produceren van een product waarbij er energie gebruikt wordt. De installatie omhult het transport en het bouwen op de werf. Alles wat schoonmaak, herstellingen en onderhoud betreft wordt gecategoriseerd in het gebruik. Na het gebruik zal het materiaal moeten worden hergebruikt of gesloopt worden, de zogenaamde levenseindefase. Onderstaande figuur 7 toont het verloop van de levenscyclus van een willekeurig materiaal.



Figuur 7: Levenscyclusanalyse fases [7]

Om een levenscyclusanalyse uit te voeren moeten alle materialen van een structuur in rekening worden gebracht. In een inventarisatiefase zal van ieder materiaal de detailgegevens verzameld worden. Via bepaalde weegfactoren krijgt ieder materiaal een milieu-impact. Deze kunnen uiteindelijk vergeleken worden met elkaar waardoor kan worden vastgesteld welk materiaal het meest duurzame is. Een ander resultaat dat volgt uit de levenscyclusanalyse is de milieu-impact tijdens iedere fase. Door middel van een LCA kan een structuur bepaalde certificaten verkrijgen wat ten goede komt voor het duurzaam bouwen.

2.5 Brandveiligheid

2.5.1 Brandweerstand

Een structuur onderhevig aan brand zal op een bepaald moment zijn sterkte verliezen. Door de hoge temperaturen kunnen materialen sneller de vloeigrens bereiken waardoor de constructie kan falen. De brandweerstand van een materiaal wordt gekenmerkt door de tijd dat de verschillende materialen hun desbetreffende functies blijven vervullen in het geval van brand. Om de brandweerstand van verschillende materialen te vergelijken werd vroeger gebruik gemaakt van een Rf-waarde. Als men bijvoorbeeld sprak van Rf30, houdt dit in dat het materiaal een brandweerstand van 30 minuten heeft. Het materiaal vervult dus zijn functie gedurende een blootstelling aan brand die 30 minuten optreedt op het materiaal. De Rf-waarde is een verouderde aanduiding, maar deze wordt in de praktijk nog veel gebruikt. Tegenwoordig zal de brandweerstand volgens de Europese normen beschreven worden. Er is een onderscheid gemaakt tussen algemene structuren en niet dragende elementen.

Wanneer er een brand uitbreekt in een gebouw, is het voornaamste dat het materiaal zijn mechanische eigenschappen blijft behouden. De stabiliteit moet dus gegarandeerd zijn. De structuur moet ook een bepaalde vlamdichtheid bezitten. Dit is de eigenschap van een materiaal waardoor vlammen of ontvlabbare gassen niet door het materiaal, spleten of voegen gaan. Als laatste moet verhinderd worden dat de temperatuur hoog oploopt aan de wanden. Dit kan bereikt worden door middel van thermische isolatie. Al deze eigenschappen staan beschreven in de Belgische norm NBN 713.020. Deze norm beschrijft de algemene brandweerstand bij bepaalde belastingen, maar ook de brandweerstand van de verschillende materialen. [8]

In vergelijking met de verouderde Rf-waarde staan er in de huidige normen andere letters. In tabel 3 worden de letters weergegeven met de betekenis en een korte omschrijving.

Tabel 3: Huidige brandweerstandletters [8]

Letter	Betekenis	Omschrijving
R	Draagcapaciteit	Afhankelijk van draagvermogen en vervormingssnelheid
E	Integriteit	Doorlaatbaarheid (vlammen en gassen) van materiaal
I	Isolatie	Temperatuur op de muur beperken

Er zijn nog enkele andere, minder frequent voorkomende, letters zoals W (*radiation*), M (*mechanical action*), C (*self-closing*), S (*smoke leaking*). Het belangrijke is de volgorde van de letters. Als een bepaalde structuur niet voldoet aan bijvoorbeeld de draagcapaciteit R, moet dit probleem eerst worden opgelost, vooraleer de volgende categorieën bekeken worden.

Bij het testen van materialen wordt gebruik gemaakt van thermokoppels. In de norm EN1363-1 staat beschreven hoeveel thermokoppels er aanwezig moeten zijn en op

welke plaats ze moeten staan. In een test op een 3D-structuur met koud gevormde dunwandige elementen zijn thermokoppels gebruikt. Een typische industriehal met een normale belasting werd onderworpen aan brand. Met behulp van de 22 thermokoppels geplaatst op de muren, kolommen en plafondpanelen werd de temperatuur opgemeten. Tijdens een natuurlijke brand bekwam men een brandweerstand van 62 minuten. Via een eindige-elementen programma 'SAFIR', waarbij de structuur volledig in gemodelleerd werd, is een resultaat van 54 minuten bekomen. De testen werden gestopt wanneer de structuur niet meer stabiel was. Uit een ander experiment op een SRC (*Steel Reinforced Concrete*) structuur blijkt dat deze soort opbouw van structuur een zeer goede brandweerstand heeft. Het falen wordt voornamelijk veroorzaakt door het individueel falen van de verbindingen. [9]

2.5.2 Verhogen brandweerstand

De meeste bouwmaterialen zijn onbrandbaar, maar dit wil niet zeggen dat het een hoge brandweerstand heeft. Het materiaal staal is onbrandbaar en heeft een kritieke temperatuur tussen de 400°C en 500°C. Na deze kritieke temperatuur kan de structuur bezwijken. Om de brandweerstand van staal te berekenen kan gebruik gemaakt worden van Eurocode EN1993-1-2. De brandweerstand van een stalen profiel is afhankelijk van de massiviteit. Deze is afhankelijk van de doorsnede en de belaste omtrek. Een slanker profiel heeft dus een lagere massiviteit dan een groter en zwaarder profiel. Een structuur van staal kan beschermd worden door een brandwerend verfsysteem of beplating. Het verfsysteem bestaat uit een primer, actieve laag en een beschermende eindlaag. Een beplating is een isolerende laag waardoor de temperatuur van het profiel langer beperkt blijft. Verschillende materialen zoals gipskartonplaten of calciumsilicaatplaten kunnen gebruikt worden. Een andere mogelijkheid om stalen structuren een brandweerstand te geven, is het overdimensioneren. Deze methode vraagt een specifieke berekening.

Net als staal is beton eveneens onbrandbaar. Beton heeft een zeer hoge brandweerstand en wordt berekend via Eurocode EN1996-1-2. De meeste betonnen structuren voldoen aan een bepaalde eis op het gebied van brandweerstand. Indien dit niet het geval zou zijn, kan er gebruik gemaakt worden van een beplating of omkasting. Als materiaal voor deze beplating kan hetzelfde materiaal gekozen worden als de bescherming van de stalen structuren.

Hout is het enige materiaal dat besproken wordt die wel brandbaar is. Door het carboniserend vermogen van hout heeft het toch een zekere brandweerstand. Met behulp van Eurocode EN1995-2-2 kan de stabiliteit van houten constructies bij brand bepaald worden. Hout kan niet brandwerend worden gemaakt, maar door een brandvertragende behandeling kan de brandveiligheid wel sterk verbeterd worden. Eveneens door middel van een beplating, zoals bij de andere materialen, kan de brandweerstand verhoogd worden. Ook hier kan weer gebruikt gemaakt worden van overdimensionering. De brandklasse speelt bij hout een belangrijke rol. Brandklasse, ook wel brandgedrag of brandreactie genoemd, is een classificatie waarin bepaald wordt hoe brandbaar een structuur is. De brandklasse van hout kan verbeterd worden door verf, vernis of impregnatie. Door deze behandelingen wordt er een brandvertragende oplossing gecreëerd.

3 Standaard industriehal

Als standaard industriehal is een industriehal gekozen waarbij de afmetingen constant blijven voor de drie verschillende materialen: staal, geprefabriceerd beton en in situ gestort beton in combinatie met houten gelamelleerde liggers. Het ontwerp van de standaard industriehal dient zo eenvoudig mogelijk te zijn, zodat enkel het materiaal de bepalende factor is tussen de drie verschillende industriehallen. Hierdoor is de vergelijking tussen de drie industriehallen gemakkelijker en wordt een betekenisvol resultaat bekomen. Hieruit kan worden afgeleid welk materiaal het beste presteert op economisch en ecologisch gebied. De belasting op het dak en de wanden zal net zoals de afmetingen constant blijven. Dit met uitzondering van het eigengewicht van de dragende elementen, aangezien deze belasting materiaalafhankelijk is.

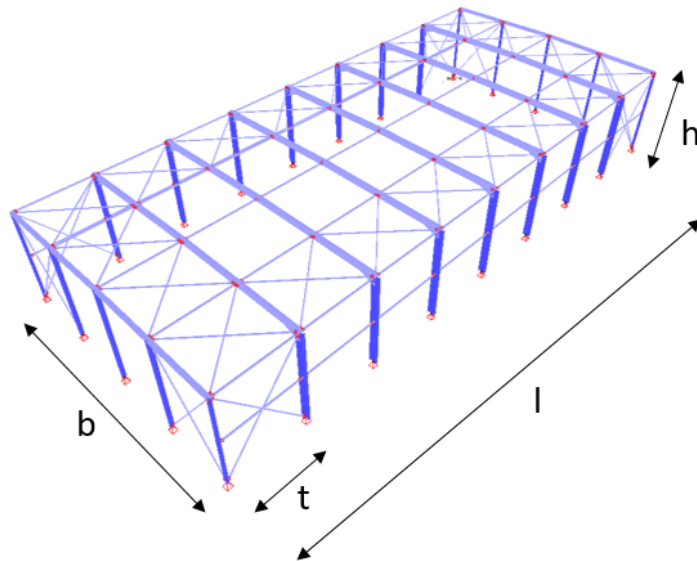
3.1 Afmetingen

De afmetingen van de standaard industriehal zijn gekozen naargelang de praktijktoepassing en eenvoudigheid van de industriehal. Deze afmetingen van de standaardhal zijn weergegeven in tabel 4. Als standaardoverspanning is er geopteerd voor een lengte van 18 meter, zodat in geval van staal, gewone I-profielen of H-profielen toegepast kunnen worden als ligger zoals te zien in figuur 8. Bij overspanningen vanaf 21 meter zal het toepassen van vakwerkliggers voordeliger zijn in het nodige aantal kilogram staal per vierkante meter. Dit wordt verder besproken bij de industriehal met variabele overspanning.

De hoogte van de industriehal bedraagt 6 meter. Deze afmeting volgt uit de mogelijkheid tot toegang voor vrachtwagens die hun lading moeten lossen of laden. Voor de tussenafstand van de portieken is een afstand van 5 meter aangenomen. Deze afstand is zo gekozen dat de dakopbouw in de praktijk veelal wordt opgebouwd uit steeldeckplaten met isolatie en dakdichting. Voor de wanden worden regelmatig sandwichpanelen¹ toegepast die eveneens veelal ontworpen zijn om een overspanning van 5 meter te realiseren. Deze sandwichpanelen worden zéér vaak toegepast in de industriebouw. Er zijn ook andere mogelijkheden om de daken en wanden te bekleden maar om het ontwerp zo eenvoudig mogelijk te houden wordt hier geen rekening mee gehouden. De dakbedekking wordt in rekening gebracht bij het berekenen van de constructie aangezien deze een lijnlast genereren op de verschillende liggers. Het laatste aspect van het ontwerp is de dakhelling. Er moet altijd een minimale dakhelling voorzien worden in een constructie zodat het regenwater afgevoerd kan worden.

Er zijn geen inwendige kolommen in de structuur. De hal is één grote open ruimte vanbinnen. Wanneer er wel inwendige kolommen zouden zijn, zou er met een dragende ligger gewerkt kunnen worden waarop de andere liggers aansluiten. Bij dit ontwerp kunnen de staalprofielen lichter zijn aangezien de belasting beter verspreid wordt over de kolommen. Om goede besluiten te kunnen trekken dient het ontwerp echter zo eenvoudig mogelijk te zijn. Hierdoor is er geopteerd om deze kolommen niet te voorzien.

¹ Sandwichpanelen zijn twee metalen platen die tussenin een laag isolerend materiaal en dampscherm bevatten. Het isolerend materiaal is vaak PUR of steenwol.



Figuur 8: Ontwerp parameters

De bepalende parameters van de standaard industriehal zijn de volgende:

- l = lengte van de hal,
- b = overspanning van de portieken,
- t = tussenafstand van de portieken,
- h = hoogte van de kolommen,
- Dakhelling.

Tabel 4: Afmetingen standaard industriehal

l	40 m
b	18 m
t	5 m
h	6 m
Dakhelling	2 %

3.2 Belastingen

De industriehal is onderhevig aan vijf verschillende belastingen:

- Eigengewicht,
- Permanente belasting,
- Nuttige last daken,
- Windbelasting,
- Sneeuwbelasting.

Deze belastingen worden ingegeven in analyseprogramma Diamonds, dat vervolgens de mogelijke belastingscombinaties bepaald. De belastingen die hierboven vermeldt zijn, uitgezonderd het eigengewicht, zijn voor de drie verschillende industriehallen gelijk.

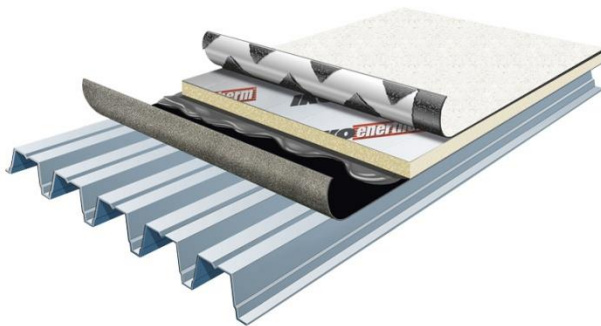
Dit is omdat deze belastingen ofwel omgevingsafhankelijk zijn (wind- en sneeuwbelasting) ofwel afgeleid zijn uit de Eurocode.

3.2.1 Eigengewicht

Het eigengewicht van de constructie is afhankelijk van de gebruikte profielen. Deze belasting dient zo laag mogelijk te zijn. Dit wil zeggen dat de industrieel gedimensioneerd moet worden met de meest optimale profielen, zodat de staalconstructie net voldoet aan sterkte en stabiliteit en dat het economisch het meest voordelig is. Het analyseprogramma *Diamonds* brengt het eigengewicht van de constructie automatisch in rekening. [10]

3.2.2 Dakbelasting

Deze belasting vertegenwoordigt de dakbedekking op de dakconstructie. De dakbedekking bestaat uit geprofileerde staalplaten van onder, isolatielaag, een dampscherm en een toplaag bestaande uit een membraan, zoals roofing of EPDM. Figuur 9 toont de opbouw van het dak.



Figuur 9: Dakbelasting [11]

De waarde van de permanente belasting wordt aangenomen als $0,3 \text{ kN/m}^2$ en wordt in *Diamonds* ingegeven als een lijnlast op de portieken. Deze belasting wordt overgedragen op de liggers. Bij het instellen van deze belasting dient er een onderscheid gemaakt te worden tussen de kopgevels en de standaardportieken. De reden hiervoor is, dat de ligger van de kopgevel een andere belasting opneemt dan de standaardportieken. De tussenafstand van de portieken bedraagt 5 meter. De portiek van de kopgevel neemt een belasting over een afstand van 2,5 meter op, terwijl de standaardportieken een belasting over een afstand van 5 meter opnemen.

$$\text{Belasting op kopgevel} = 0.3 \text{ kN/m}^2 * 2,5\text{m} = 0.75 \text{ kN/m}$$

$$\text{Belasting op standaardportieken} = 0.3 \text{ kN/m}^2 * 5\text{m} = 1.5 \text{ kN/m}$$

3.2.3 Nuttige last daken

Nuttige last daken is de onderhoudsbelasting die tijdelijk optreedt op de daken. Deze komt enkel voor indien er nood is aan onderhoud van het dak. Deze belasting dient in *Diamonds* gedefinieerd te worden als een incompatibele lastengroep, omdat het incompatibel is met de wind- en sneeuwbelasting. Dit wil zeggen dat de onderhouds-, wind- en sneeuwbelasting niet gelijktijdig kunnen optreden.

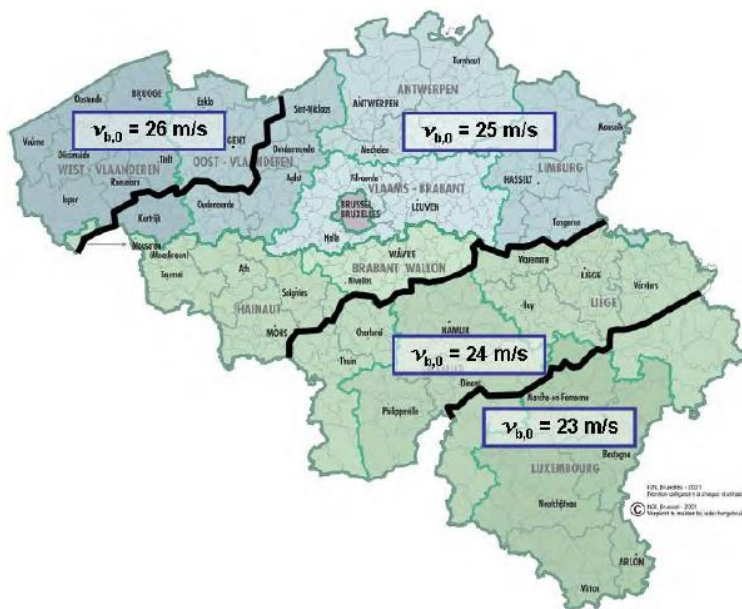
De waarde van de nuttige last voor daken wordt door Eurocode bepaald als $0,8 \text{ kN/m}^2$. Het instellen van deze belasting in *Diamonds* is gelijkaardig aan de dakbelasting.

$$\text{Belasting op kopgevel} = 0.8 \text{ kN/m}^2 * 2,5\text{m} = 2 \text{ kN/m}$$

$$\text{Belasting op standaardportieken} = 0.8 \text{ kN/m}^2 * 5\text{m} = 4 \text{ kN/m}$$

3.2.4 Windbelasting

De windbelasting wordt gegenereerd met behulp van een generator in *Diamonds*. Deze genereert de belastingen conform de Eurocodes. De basiswindsnelheid waarmee de generator rekt, bedraagt 25 m/s . Zoals te zien op figuur 10 valt Limburg geheel in deze zone. Dit is een algemene waarde die voor een gedeelte van België geldt. Voor een meer gedetailleerde waarde van de windsnelheid, kan de Eurocode NBN EN 1991-1-4 ANB geraadpleegd worden.



Figuur 10: ANB: Basiswindsnelheden bepaald per gebied

De optredende windbelasting is ook afhankelijk van de terreincategorie. Dit wordt ook in rekening gebracht door de windgenerator, maar dient gekozen te worden door de ontwerper. Er is hier geopteerd voor een terreincategorie III, omdat industriehallen gebouwd worden in industriezones. Deze terreincategorieën zijn weergegeven in tabel 5. [12]

Tabel 5: Terreincategorieën [12]

Categorie 0	Zee, directe blootstelling aan zeewinden
Categorie I	Vlakke horizontale gebieden zonder obstakels
Categorie II	Landelijke gebieden met geïsoleerde obstakels
Categorie III	Dorpen, voorsteden, industrie, wouden
Categorie IV	Steden

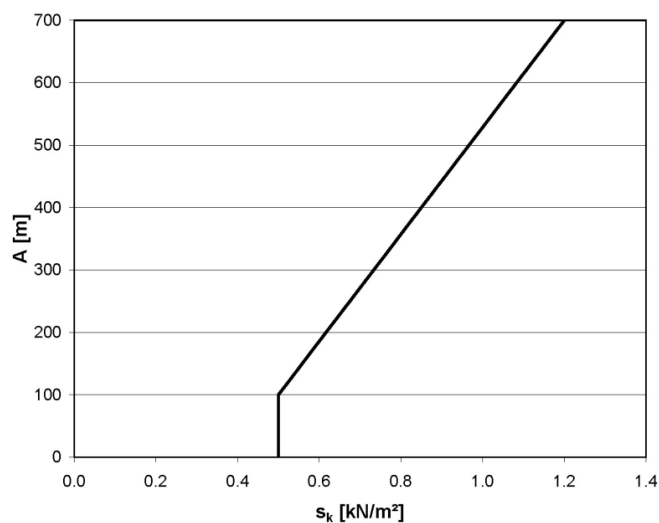
3.2.5 Sneeuwbelasting

Ook de sneeuwbelasting wordt gegenereerd met behulp van een generator. Deze genereert de belastingen conform de Eurocode NBN EN 1991-1-3. Deze generator maakt eveneens een onderscheid tussen de kopgevel en de standaardportieken waarvoor de belasting verschillend zal zijn.

De waarde van de sneeuwbelasting s_k hangt af van de hoogte A waar de industriehal zich bevindt: [13]

- $s_k = 0.50 \text{ kN/m}^2$ voor $A_{sk} \leq 100 \text{ m}$,
- $s_k = 0.50 + 0.007 * \frac{A_{sk}-100}{6} \text{ kN/m}^2$ voor $100 \text{ m} < A_{sk} \leq 700 \text{ m}$.

De relatie hiervan is weergegeven in onderstaande figuur 11.



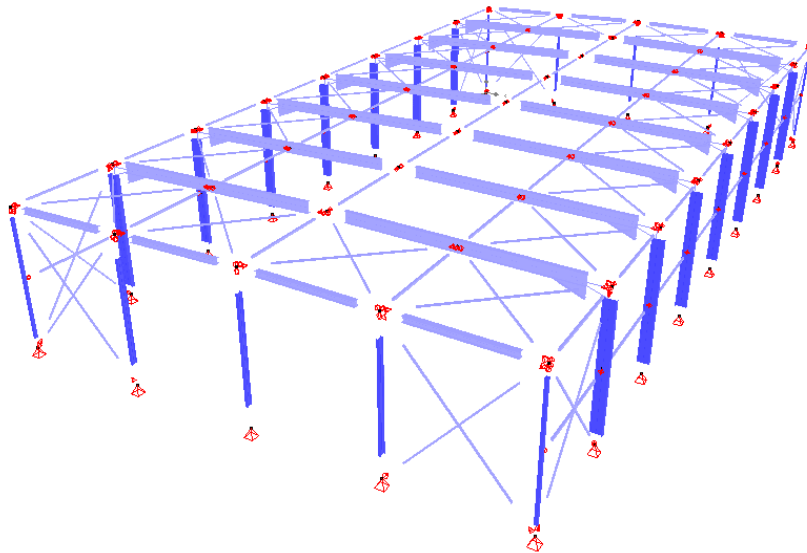
Figuur 11: Karakteristieke waarde van sneeuwbelasting [13]

Er is verondersteld dat de hoogte waar de industriehal zich bevindt kleiner is dan 100 meter. Hierdoor bedraagt de waarde van de sneeuwbelasting dus 0,5 kN/m².

3.3 Knikverschijnsel

Het knikverschijnsel dient in rekening te worden gebracht in *Diamonds*, zodat dit fenomeen niet optreedt en de profielen niet overgedimensioneerd moeten worden. Zoals aangehaald in de literatuurstudie heeft een constructie-element meestal een sterke as en een zwakke as. In *Diamonds* wordt de y-as van het constructie-element gedefinieerd als de sterke as en de z-as als de zwakke as. De verschillende constructie-elementen waar knik kan optreden, moeten indien mogelijk volgens de zwakke as gesteund worden. Een voorbeeld van dergelijke steunen zijn de drukkokers. Deze constructie-elementen verkleinen de kniklengte van het te steunen element, waardoor de kans op knik aanzienlijk vermindert.

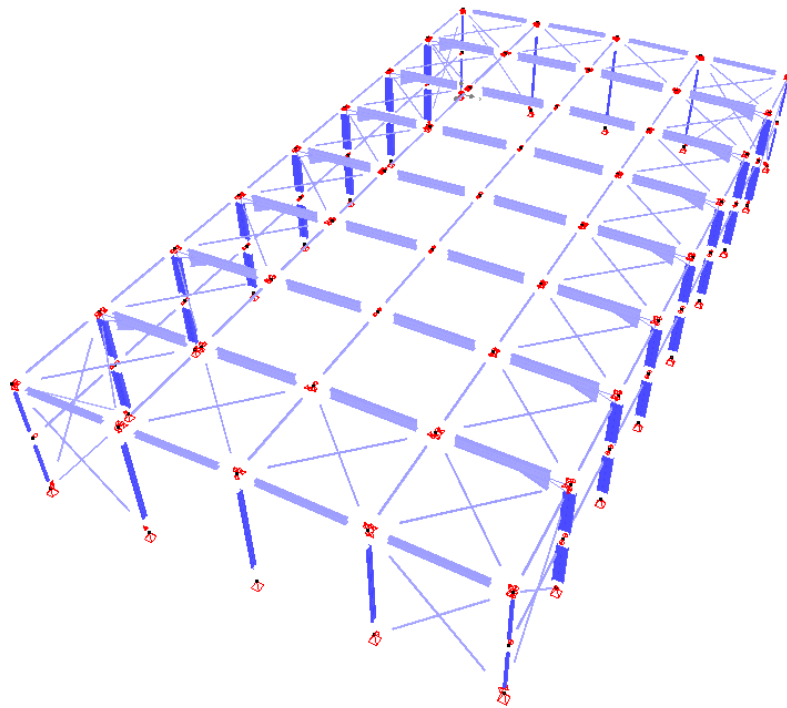
In *Diamonds* wordt het knikverschijnsel in rekening gebracht door middel van het definiëren van de knikgroepen² van de verschillende constructie-elementen. De kniklengtes worden volgens de twee verschillende assen afzonderlijk gedefinieerd. De volgende figuren geven de definiëring van de kniklengtes weer voor een industriehal met vollewandliggers. Deze definiëring geldt ook voor een industriehal met houten gelamelleerde liggers. Volgens de y-as worden enkel de kniklengtes van de kopliggers verkleind, omdat deze liggers gesteund worden door de tussenkolommen in de kopgevel. Dit is weergegeven in figuur 12.



Figuur 12: Definiëring van de kniklengtes volgens de y-as in de industriehal met vollewandliggers

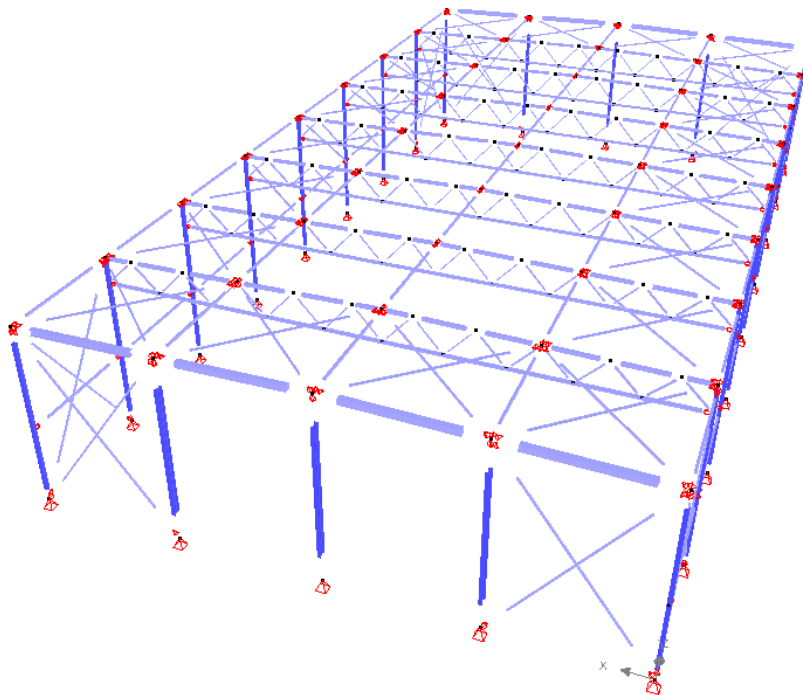
Volgens de z-as dienen de kolommen en liggers, uitgezonderd de tussenkolommen in de kopgevel gesteund te worden, wegens het lagere traagheidsmoment in deze richting. Deze constructie-elementen worden gesteund door de drukkokers. Dit is weergegeven in figuur 13.

² Knikgroepen worden in *Diamonds* gedefinieerd als de staven die opgesplitst worden wanneer een kniksteun aanwezig is. Door in het analyseprogramma de kniklengte van de staven gelijk te nemen aan de groeps lengte, wordt correct omgegaan met kniklengtes in sterke en zwakke richting.



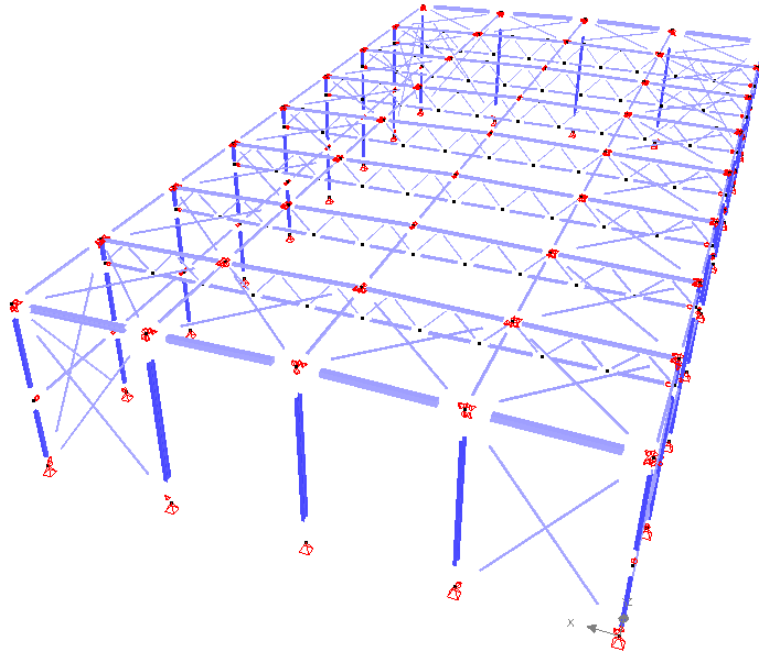
Figuur 13: Definiëring van de kniklengtes volgens de z-as in de industriehal met vollewandliggers

De volgende figuren geven de definiëring van de kniklengtes weer voor een industriehal met vakwerkliggers. Volgens de y-as worden de kniklengtes van de kopliggers en bovenliggers van de vakwerkstructuren verkleind. De kopliggers worden volgens deze as gesteund door middel van de tussenkolommen in de kopgevels. De bovenliggers worden gesteund door de diagonale constructie-elementen in de vakwerkstructuren. Deze definiëring van de kniklengtes is weergegeven in figuur 14.



Figuur 14: Definiëring van de kniklengtes volgens de y-as in de industriehal met vakwerkliggers

Volgens de z-as dienen zoals bij de industriehal met vollwandliggers alle kolommen en liggers, uitgezonderd de tussenkolommen in de kopgevels gesteund te worden. De kolommen en bovenliggers van de vakwerkstructuur worden gesteund door middel van de drukkokers. De onderliggers van de vakwerkstructuur worden gesteund door middel van de diagonalen constructie-elementen in de vakwerkstructuren. Dit is weergegeven in figuur 15.



Figuur 15: Definiëring van de kniklengtes volgens de z-as in de industriehal met vakwerkliggers

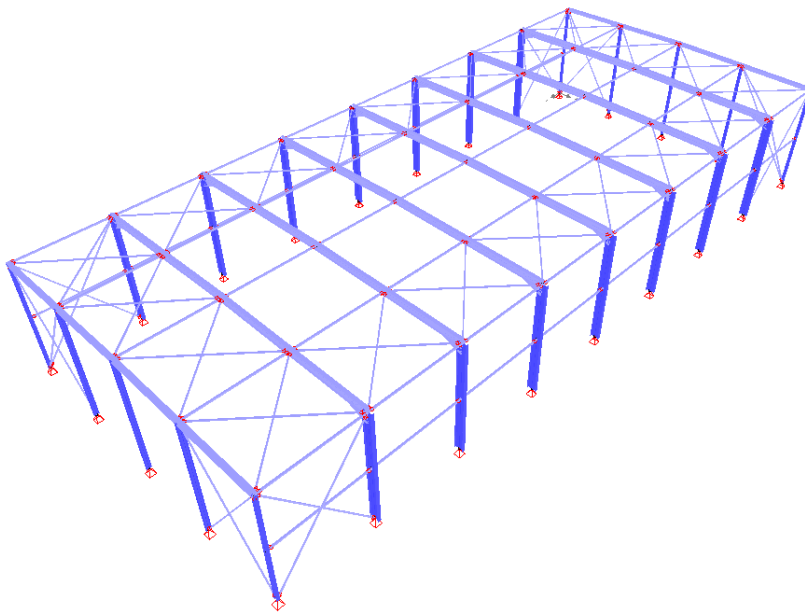
3.4 Staalconstructie

3.4.1 Ontwerp

De industriehal in staal is opgebouwd uit negen portieken met een onderlinge afstand van 5 meter. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen de twee verschillende portieken: de kopgevels en de langsgevels. De kopgevels bevatten telkens één portiek, dat samengesteld is uit twee hoekkolommen, drie tussenkolommen en twee kopliggers. Elke kolom is geplaatst op een tussenafstand van 4,5 meter. De langsgevel bevat zeven standaardportieken, die elk opgebouwd zijn uit twee kolommen en twee liggers. Er worden drukkokers gebruikt om enerzijds de negen portieken te verbinden, en anderzijds om de kniklengtes van de liggers en kolommen te verminderen.

Zoals eerder aangehaald is een hoogte gekozen van 6 meter. Echter dienen de stalen kolommen af te steunen op de fundering die vorstvrij aanzet. Hierdoor neemt de kolomlengte voor de berekeningen toe met 0,5 meter. De totale kolomlengte is dus gelijk aan 6,5 meter. Traditioneel worden de horizontale belastingen naar de fundering afgeleid via de windverbanden. Elke kolom wordt dan ook ondersteund met een scharnier.

Het ontwerp van de standaard industriehal in staal is weergegeven in figuur 16.



Figuur 16: Ontwerp industriehal staal

De gebruikte profielen zijn in eerste instantie geschat met behulp van een tabel opgesteld door het studiebureau op basis van ervaring. Deze tabel, die op vraag van de externe promotor niet in deze masterproef wordt opgenomen, geeft het type profiel voor de kolommen en liggers weer in functie van de overspanning. De profielen die uiteindelijk worden gebruikt voor de standaard industriehal in staal zijn in onderstaande tabel 6 weergegeven. De drukkokers worden door *Diamonds* benoemd als SHS-profielen, wat staat voor Square Hollow Section. Het betreft hier vierkante kokers.

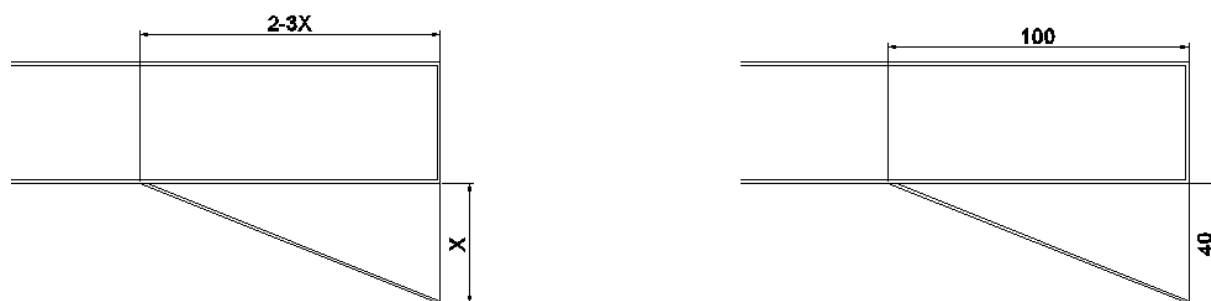
Als kolommen en liggers van de standaardportieken wordt gekozen voor liggers van het type IPE. Deze hebben in vergelijking met liggers type HEA en HEB een kleinere staalsectie voor een gelijk traagheidsmoment. Nadeel aan deze liggers zijn dan weer de grotere hoogte bij een gelijk traagheidsmoment. Dit kan van belang zijn wanneer de breedte van de hal beperkt moet zijn, maar wel een zo groot mogelijk vrije ruimte binnen de hal gewenst is.

Tabel 6: Profielen staal

Kopgevel	
Hoekkolom	HEA 120
Tussenkolom	IPE 220
Kopligger	HEA 220
Windverband	L 60x60x6
Drukkoker	SHS 80x80x3
Standaardportiek	
Kolom	IPE450
Ligger	IPE400
Windverband	L 60x60x6
Drukkoker	SHS 80x80x3
Staaltype: S235	

De standaardportieken worden ook voorzien van kniestukken. Deze verstijven de constructie en verminderen de kniklengtes van de liggers. De dimensies van deze elementen zijn weergegeven in figuur 17.

X stelt de hoogte van het profiel van ligger voor. Als voorbeeld wordt ligger type IPE400 beschouwd. Deze heeft een hoogte van 40 cm. Hieruit volgt een kniestuk met hoogte 40 cm en lengte 100 cm.



Figuur 17: Kniestukken

In de kopgevels, langsgevels en in het dak zijn windverbanden voorzien. Deze windverbanden verhogen de zijdelingse stabiliteit van de structuur. Aangezien er gerekend wordt met een windbelasting en de kolommen scharnierend met de fundering beschouwd worden, zullen deze windverbanden zeker nodig zijn. De windverbanden zijn weergegeven in figuur 16.

In de constructie moeten de vrijheidsgraden voor elk element gedefinieerd worden. In het geval dat dit niet of onjuist gebeurt, worden er onjuiste resultaten verkregen. Met andere woorden worden er aan de staafelementen randvoorwaarden opgelegd die verband houden met de wijze van overdragen van de verschillende snedekrachten van de uiteinden van de staaf naar de rest van de constructie. Deze randvoorwaarden worden opgelegd in de windverbanden, drukkokers, tussen- en hoekkolommen.

De windverbanden moeten gedefinieerd worden als trekstaven. Deze kunnen bijgevoel geen buigend moment en drukkrachten opnemen. Aan de tussen- en hoekkolommen in de kopgevels worden er randvoorwaarden op het einde van staaf opgelegd. Figuur 18 geeft de ingestelde randvoorwaarden weer. In het geval dat voor de overdracht "vrij" is ingesteld, zal deze krachtoverdracht niet mogelijk zijn, in tegenstelling tot "vast", waar de krachtoverdracht wel mogelijk is. Aan de drukkokers worden dezelfde randvoorwaarden opgelegd als aan de tussen- en hoekkolommen, maar bij de drukkokers worden deze aan beide uiteindes van de staaf voorzien. De verbinding van de kolommen van de standaardportieken met de liggers worden als momentvast beschouwd. Deze verbinding kan worden gerealiseerd met behulp van de ingevoerde kniestukken.



Figuur 18: Vrijheidsgraden drukkokers, tussen -en hoekkolommen

3.4.2 Resultaten

Nadat de staalconstructie ontworpen is en de lasten ingegeven zijn, dient een eerste-orde elastische analyse uitgevoerd te worden. Deze analyse geeft resultaten weer over:

- Doorbuiging,
- Interne krachten in de staven,
- Reactiekrachten,
- Spanningen in de staven.

Een tweede controle die uitgevoerd wordt, is de normcontrole voor staal. Deze controleert de gehele constructie op sterkte en stabiliteit. Deze controle is de meest relevante van de twee, omdat deze controle resultaten weergeeft die een onmiddellijk beeld geven dat de constructie voldoet of niet voldoet. In het geval dat de constructie voldoet, dienen er geen aanpassingen te gebeuren en kan het ontwerp aanvaard worden. De eerste controle echter geeft resultaten weer die enkel betrekking hebben op de doorbuiging, interne -en reactiekrachten en spanningen. Deze controle geeft dus geen resultaten weer over het al dan niet voldoen van de constructie. Echter dient de doorbuiging van de liggers wel nagekeken te worden omwille van de afwatering. Deze mag niet te groot zijn, anders hoopt het regenwater lokaal op en wordt de afwatering

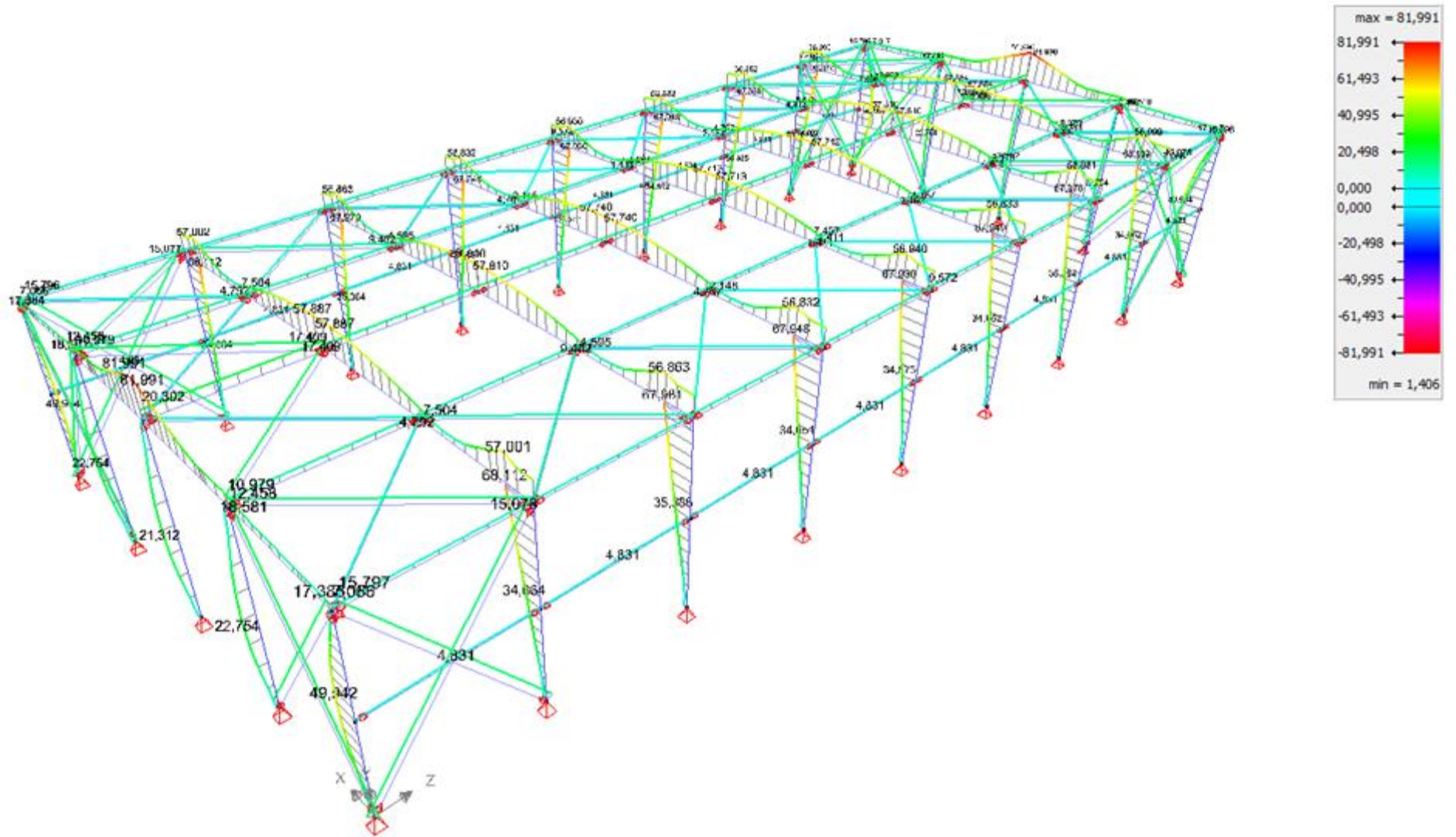
beperkt. Dit leidt vervolgens tot een extra belasting op de liggers. De doorbuiging bedraagt maximaal 61 mm in de liggers en de afwatering zal hierdoor niet belet worden.

Sterkte

De sterktecontrole controleert de constructie op de uiterste grenstoestand (UGT). De resultaten die *Diamonds* weergeeft zijn uitgedrukt in percentages. [14] De controle van de weerstand kijkt na of de berekende snedekrachten de door de norm opgelegde grenzen niet overschrijden. In overeenstemming met met de norm EN 1993-1-1 worden de volgende verificaties uitgevoerd:

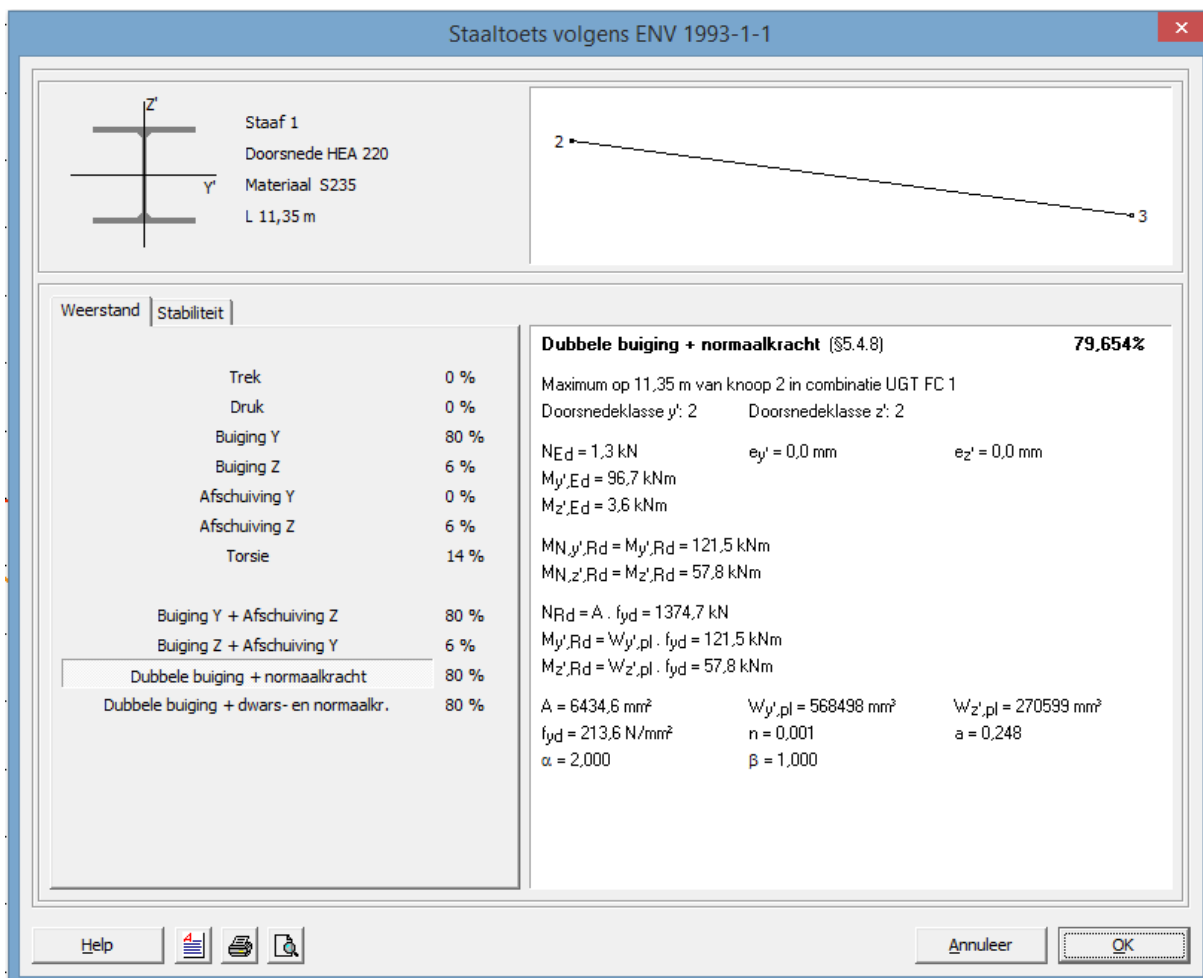
- Axiale trek
 $\rightarrow N_{Ed} \leq N_{t,Rd} = A * f_{yd} ,$
- Axiale druk
 $\rightarrow N_{Ed} \leq N_{c,Rd} = A * f_{yd} ,$
- Buiging My'
 $\rightarrow M_{y',Ed} \leq M_{y',Rd} = W_{y',pl} * f_{yd} ,$
- Buiging Mz'
 $\rightarrow M_{z',Ed} \leq M_{z',Rd} = W_{z',pl} * f_{yd} ,$
- Dwarskracht Vz'
 $\rightarrow V_{y',Ed} \leq V_{y',Rd} = A_{vy} * \frac{f_{yd}}{\sqrt{3}} ,$
- Dwarskracht Vy'
 $\rightarrow V_{z',Ed} \leq V_{z',Rd} = A_{vz} * \frac{f_{yd}}{\sqrt{3}} ,$
- Torsie
 $\rightarrow T_{Ed} \leq T_{Rd} = T_{wm} * \frac{f_{yd}}{\sqrt{3}} ,$
- Buiging My' en dwarskracht Vz'
 $\rightarrow \frac{M_{y',Ed}}{M_{Vy',Rd}} + \frac{V_{z',Ed}}{V_{z',Rd}} \leq 1 ,$
- Buiging Mz' en dwarskracht Vy'
 $\rightarrow \frac{M_{z',Ed}}{M_{Vz',Rd}} + \frac{V_{y',Ed}}{V_{y',Rd}} \leq 1 ,$
- Dubbele buiging met normaalkracht
 $\rightarrow \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \leq 1 ,$
- Dubbele buiging met normaalkracht en dwarskracht
 $\rightarrow \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} + \frac{V_{y',Ed}}{V_{y',Rd}} + \frac{V_{z',Ed}}{V_{z',Rd}} \leq 1 .$

Het weergegeven percentage in *Diamonds* geeft aan hoeveel de doorsnedes van de verschillende secties belast worden. Wanneer een element van de constructie meer dan 100% belast is, voldoet dit element niet aan de opgelegde randvoorwaarden. In dit geval dient de constructie aangepast te worden, totdat de gehele constructie voldoet. Om de resultaten te controleren kan er gebruik gemaakt worden van het resultaten configuratie venster. Figuur 19 geeft het resultaat van de sterktecontrole weer.



Figuur 19: Resultaat sterktecontrole van de staalconstructie

De gedetailleerde beschrijving van de formules zijn terug te vinden in §6.3 van de EN 1993-1-1. Onderstaand voorbeeld in figuur 20 toont de berekening van een willekeurige staaf in de standaard industriehal.

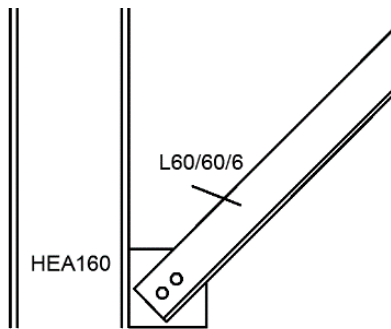


Figuur 20: Staaltoets volgens EN1993-1-1

Voor een combinatie van belastingen gebeurt de berekening aan de hand van volgende formule:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \leq 1$$

De windverbanden zijn berekend zodat slechts 80% van hun doorsnede belast wordt. Dit wordt zo gedaan omdat windverbanden bij de verbinding met een kolom of ligger een groot deel van hun oppervlak verliezen door de boutgaten. Hierdoor zal de sterkte ter hoogte van de verbinding sterk afnemen. Deze verbinding is weergegeven in onderstaande figuur 21.



Figuur 21: Verbinding windverbanden

Stabiliteit

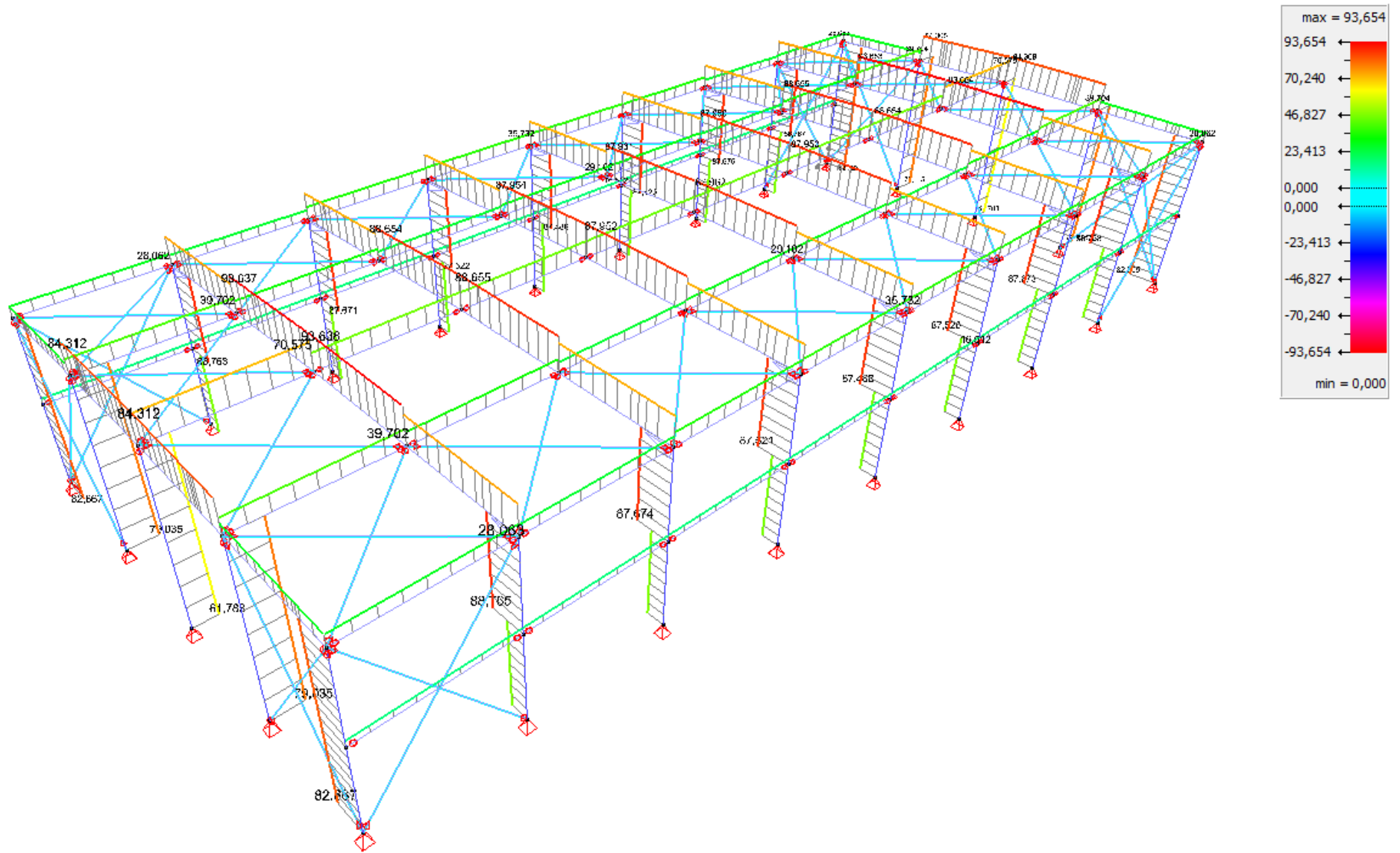
De stabiliteitscontrole controleert de knikstabiliteit van de constructie. De resultaten die *Diamonds* weergeeft zijn eveneens uitgedrukt in percentages. [14] Deze slaan ook weer op de benuttingsgraad van de verschillende secties. In overeenstemming met de norm EN 1993-1-1 worden volgende verificaties uitgevoerd:

- Buigingsknik om de sterke as
 $\rightarrow N_{Ed} \leq N_{b,y',Rd} = \chi_{y'} * A * f_{yd}$,
- Buigingsknik om de zwakke as
 $\rightarrow N_{Ed} \leq N_{b,z',Rd} = \chi_{z'} * A * f_{yd}$,
- Torsieknik³ of ruimtelijke knik⁴
 $\rightarrow N_{Ed} \leq N_{b,t,Rd} = \chi_T * A * f_{yd}$,
- Laterale torsieknik
 $\rightarrow M_{y',Ed} \leq M_{b,Rd} = \chi_{LT} * W_{y',pl} * f_{yd}$,
- Knik om de sterke as t.g.v. M_y' , M_z' en N
 $\rightarrow \frac{N_{Ed}}{N_{b,y',Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{b,y',Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \leq 1$,
- Knik om zwakke as t.g.v. M_y' , M_z' en N
 $\rightarrow \frac{N_{Ed}}{N_{b,z',Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{b,y',Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \leq 1$.

Als een element van de constructie dat een waarde heeft die groter is dan 100%, er niet voldaan is aan de stabiliteit. In dat geval dient weer de constructie aangepast te worden, totdat de gehele constructie voldoet. Figuur 22 geeft het resultaat van de stabiliteitscontrole weer.

³ Torsieknik treedt op indien een staaf knikt door enkel wringing. Dit instabiliteitsverschijnsel treedt enkel op bij korte staven met betrekkelijk brede flenzen.

⁴ Ruimtelijke knik treedt op indien een staaf knikt door de combinatie van buiging en wringing. Dit is enkel het geval als het zwaartepunt van het profiel en het dwarskrachtmiddelpunt niet samenvallen.



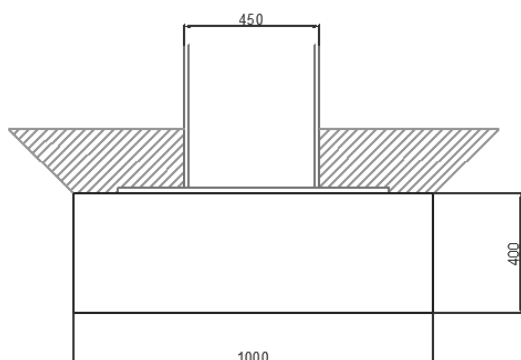
Figuur 22: Resultaat stabiliteitscontrole van de staalconstructie

3.4.3 Fundering

Om een realistische benadering te krijgen van de volledige constructie moet eveneens de fundering in rekening worden gebracht. Het funderingstype is afhankelijk van de kwaliteit van de grond. Aangezien de industriehal op een willekeurige plaats kan staan wordt er aangenomen dat het funderingstype bestaat uit een funderingszool. Een voorbeeld van een funderingszool is weergegeven in figuur 23. De toelaatbare funderingsdruk q'_{ad} is ook afhankelijk van de grond. Aangezien er geen sonderingsverslag beschikbaar is wordt er aangenomen dat de grond een toelaatbare funderingsdruk heeft van $1,5 \text{ kg/cm}^2$. Deze aanname stemt overeen met een goede draagkrachtige ondergrond met aanvaardbare zettingen. Om de afmetingen van de zool te berekenen wordt onderstaande formule toegepast:

$$\text{Oppervlakte zool} = \frac{R}{q'_{ad}}$$

De oppervlakte van de zool is afhankelijk van de toelaatbare funderingsdruk en de reactiekracht R op de zool. Deze reactiekracht is niet enkel de puntlast van de kolom, maar ook het eigengewicht van de zool, het grondpakket op de zool en een bepaalde gebruiksbelasting van de hal. Deze gebruiksbelasting grijpt niet rechtstreeks op de zool aan, maar ze wordt wel doorgegeven via het grondpakket dat nog op de zool ligt. Figuur 23 geeft de opbouw van de fundering inclusief de kolom en het grondpakket weer. De in de hal opgelegde gebruiksbelasting volgt uit de Belgische norm NBN EN 1991-1-1-ANB en bedraagt 500 kg/m^2 . Dit is terug te vinden in figuur 24 bij E/E2. Naargelang de specifieke eisen van de hal, kan deze gebruiksbelasting nog aangepast worden. Het eigengewicht is nog niet gekend aangezien de nodige oppervlakte niet bekend is. Hierdoor zal er door middel van interpolatie een correcte zool gekozen worden.



Figuur 23: Funderingszool

Gebruiksklassen		Verticale belastingen			Horizontale belastingen		
		q_k [kN/m ²] <small>(2) (13)</small>	Q_k [kN]	A (Q _k) <small>(1)</small>	q_k [kN/m] <small>(6)</small>	Q_k [kN] <small>(1)</small>	Q_k [kN] <small>(8)</small>
Specifiek gebruik	Voorbeeld						
D	D1 : Zones in gewone kleinhandelszaken D2 : Zones in grootwarenhuizen	5,0 5,0	4,0 7,0		1,0	1,0	0,5
E	E1 : Zones waar goederen kunnen worden gestapeld, inclusief toegangszones E2 : Industrieel gebruik	7,5 <small>(10)</small> 5,0 <small>(10)</small>	7,0 5,0	Vierkant met 50 mm breedte	2,0	1,0	0,5
F	Verkeers- en parkeerzones (≤ 30 kN totaal gewicht en ≤ 8 zitplaatsen zonder de chauffeur)	2,5	20		Buitengewone belastingen ten gevolge van de schok van een voertuig : zie EN 1991-1-7		
G	Verkeers- en parkeerzones voor middelzware voertuigen (> 30 kN en ≤ 160 kN totaal gewicht, op 2 assen)	5,0	90		Buitengewone belastingen ten gevolge van de schok van een voertuig : zie EN 1991-1-7		
H	Daken enkel toegankelijk voor gewoon onderhoud en herstelling	0,8 <small>(5)</small>	1,5	Vierkant met 50 mm breedte	-		
I	Toegankelijke daken van gebouwen met als activiteiten A tot G		Volgens klasse A-G				
K	Toegankelijke daken voor speciale diensten	Landingsplaatsen voor helikopters		Te bepalen (zie EN)			

Figuur 24: Mobiele belasting [15]

Om de berekening aan te vatten is er in eerste instantie geen rekening gehouden met het grondpakket, mobiele belasting en eigengewicht van de zool. Er is een standaard dikte aangenomen van 40 cm. De kolommen in de langsgevel hebben een maximale verticale normaalkracht van 119,12 kN. Dit is de puntkracht die rechtstreeks op de fundering aangrijpt.

$$\text{Oppervlakte zool} = \frac{R}{q'_{ad}} = \frac{119,12 \text{ kN}}{0,015 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}} = 7941 \text{ cm}^2.$$

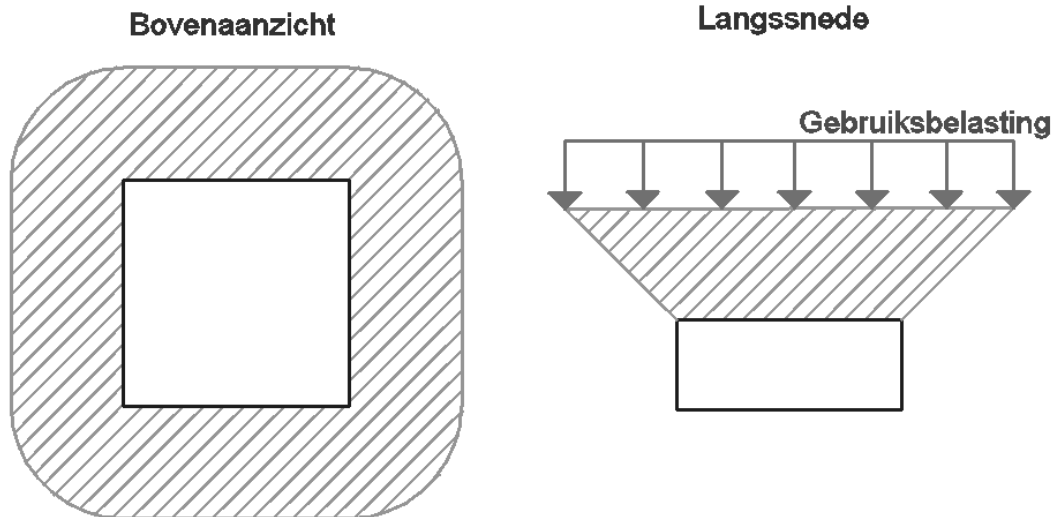
$$\text{Lengte zijde} = \sqrt{\text{Oppervlakte zool}} = \sqrt{7941} = 89,11 \text{ cm}$$

Een vierkante zool van 90 cm op 90 cm zou in principe toe komen. Het eigengewicht en grondgewicht moeten echter nog in rekening worden gebracht. Er wordt dus gerekend met een zool van 100 cm op 100 cm.

$$\text{Eigengewicht zool} = 25 \text{ kN/m}^3 * 1 \text{ m} * 1 \text{ m} * 0,40 \text{ m} = 10 \text{ kN}$$

De fundering heeft een aanzetdiepte van 50 cm. Het gewicht van het grondpakket kan ook berekend worden. Dit zoals te zien in figuur 25. Uit deze figuur volgt ook de oppervlakte waarop de gebruiksbelasting optreedt⁵.

⁵ Als hoek van inwendige wrijving ϕ van de grond wordt 45° aangenomen. Afhankelijk van de specifieke grondkarakteristieken, dient deze hoek van inwendige wrijving eventueel aangepast te worden.



Figuur 25: In te rekenen grondpakket en gebruiksbelasting

$$\begin{aligned}
 \text{Gewicht grondpakket} &= (1\text{m} * 1\text{m} * 0.40\text{m} * 2000 \text{ kg/m}^3) + \left(\frac{0.50\text{m} * 0.50\text{m} * 1\text{m}}{2}\right) \\
 &+ \left(\pi * 0.50\text{m} * \sqrt{0.50^2\text{m} + 0.50^2\text{m}} * 2000 \text{ kg/m}^3\right) \\
 &= 3271.441 \text{ kg} = 32.71\text{kN}
 \end{aligned}$$

$$\text{Impact voor gebruiksbelasting} = \pi * 0.50\text{m}^2 + 4 * 0.50\text{m} * 1\text{m} + 1\text{m} * 1\text{m} = 3.785 \text{ m}^2$$

$$\text{Gebruiksbelasting Puntlast} = 3.785 \text{ m}^2 * 600 \text{ kg/m}^2 = 1892.699 \text{ kg} = 18.93 \text{ kN}$$

$$\text{Totale belasting} = 119.12 \text{ kN} + 10 \text{ kN} + 32.71 \text{ kN} + 18.93 \text{ kN} = 180,76 \text{ kN}$$

$$\text{Draagkracht zool} = 100 \text{ cm} * 100\text{cm} * 0.015 \text{ kN/cm}^2 = 150 \text{ kN}$$

De totale belasting is groter dan de draagkracht van de zool. Hierdoor zal de zool groter gemaakt moeten worden. Bij een zool van 120 cm op 120 cm is de draagkracht wel groter, namelijk 216 kN ten opzichte van 193 kN en dus zal de zool voldoen. Tabel 7 toont een overzicht van de berekening in Excel.

Tabel 7: Berekening funderingszool

Dikte fundering	0,4	m
Aanzetdiepte	0,5	m

Reactiekracht kolom	119,12	kN
Grondeigenschappen	1,5	kg/cm ²
	0,015	kN/cm ²

Nodige oppervlakte	7941,33	cm ²
Lengte zijde	89,11	cm
Lengte afgerond	120	cm

Eigengewicht zool	14,4	kN
--------------------------	------	----

Grondpakket	3673,44	kg
	36,73	kN

Gebruiksbelasting	4,63	m ²
Puntlast	2312,70	kg
	23,13	kN

Uiteindelijke last	193,38	kN
---------------------------	--------	----

Draagkracht zool	216	kN	OK
-------------------------	-----	----	----

De kolommen op de kopgevel hebben een kleinere puntlast en dus zal een kleinere fundering voldoende zijn. De grootste puntlast in de kopgevel bedraagt 42 kN. Na de berekening volgt dat de nodige afmetingen 80cm op 80cm zijn. Sommige puntlasten in de kopgevel zijn kleiner als deze 42 kN. Omdat in de praktijk dezelfde zolen worden uitgegraven is hier ook geopteerd om overal in de kopgevel dezelfde funderingszool te gebruiken.

3.4.4 Prijsbepaling

Om de kostprijs van de staalconstructie te bepalen is er rekening gehouden met een gemiddelde offerteprijs voor het leveren en plaatsen van een staalconstructie. Deze prijs is bepaald aan de hand van diverse aanbestedingsprijzen gekend bij studiebureau V2S op het moment van het opstellen van deze masterproef. Deze bedraagt op dat moment 2,00€/kg staal. [16] Als het totale gewicht van de constructie gekend is, kan de totale kostprijs ook berekend worden. In *Diamonds* is er een algemeen venster waar het gewicht van ieder element apart nagekeken kan worden. Er wordt echter geen rekening gehouden met bouten, kop -en voetplaten en andere verbindingen. Hiervoor moet er bij het totale gewicht twee extra toeslagen bijgeteld worden. Deze bedragen 8% voor kop – en voetplaten en 6% voor lassen en bouten. [16]

De kostprijs van de fundering is afhankelijk van de verschillende aannemers. Iedere aannemer heeft een andere prijs voor enerzijds de grondbewerking en voorbereiding, anderzijds het materiaal beton en wapening. Er is een standaardprijs gehanteerd voor de berekening, namelijk 168,94 €/m³. Dit bedrag is gebaseerd op het gemiddelde van vijf verschillende aannemers. De prijzen van de verschillende aannemers zijn verkregen dankzij V2S.

Tabel 8 geeft een overzicht van de prijsbepaling bij een staalstructuur. De totale kostprijs bedraagt €52919,93. Dit is de prijs van de volledige structuur, inclusief funderingszolen.

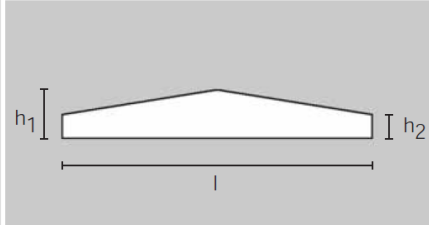
Tabel 8: Prijsbepaling staalstructuur

		Hoeveelheid [kg]	Eenheidsprijs [€/kg]	Prijs [€]
Liggers (staal)	HEA220	1777,60	2,00	3555,20
	IPE400	8168,16	2,00	16336,32
Kolommen (staal)	HEA120	501,48	2,00	1002,96
	IPE450	6844,32	2,00	13688,64
	IPE220	339,55	2,00	679,10
		669,67	2,00	1339,34
Drukkokers (staal)	SHS 80*80*3	1988,00	2,00	3976,00
Windverband (staal)	L 60*60*6	1453,68	2,00	2907,36
		347,33	2,00	694,66
		167,62	2,00	335,23
		165,89	2,00	331,78
Totaal (excl. toeslag)		22423,30	2,00	44846,59
Toeslag 1		1793,86	2,00	3587,73
Toeslag 2		1345,40	2,00	2690,80
Totaal		25562,56	2,00	51125,11
Fundering	Zool 120*120*40	8,06	168,94	1362,33
	Zool 80*80*40	2,56	168,94	432,49
			TOTALE PRIJS [€]	52919,93

3.5 Betonstructuur met houten gelamelleerde liggers

3.5.1 Ontwerp

De tweede constructiewijze die wordt besproken is de betonstructuur met houten gelamelleerde liggers. Deze structuur bestaat uit ter plaatse gestorte betonnen kolommen waarop de houten liggers rusten. De windverbanden en drukkokers bestaan net zoals bij de volledige staalstructuur uit staal. De vierkante betonnen kolommen hebben een standaardafmeting van 30 cm op 30 cm. Voor de dimensionering van de houten liggers is er rekening gehouden met enkele vuistregels binnen het ontwerpgebied van houtstructuren. Figuur 26 toont de standaardafmetingen van een zadeldakligger met rechte onderzijde.

Mogelijke overspanning	10–50 m	
Gebruikelijke dakhelling	2–5°	
Onderlinge afstand	5–7 m	
Uitkragingen	aan beide zijden mogelijk	
Breedte van de liggers	10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26 en 30 cm	
Hoogte van de liggers (ontwerp in de planningfase)	$h_1 = \frac{l}{16}$ $h_2 = \frac{l}{30}$ tot $\frac{l}{40}$	

Zadeldakligger met rechte onderzijde

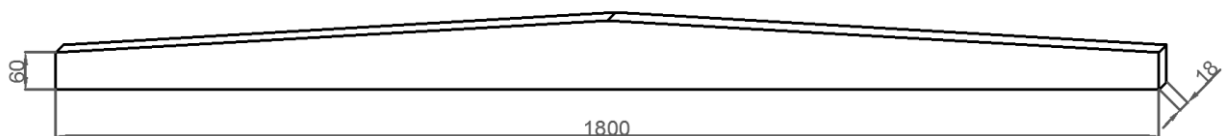
Figuur 26: Derix zadeldakligger met rechte onderzijde [4]

De overspanning van de standaard industriehal bedraagt 18 meter. Als breedte van de ligger wordt er gekozen voor 18 cm. Door rekening te houden met bovenstaande vuistregels worden de volgende afmetingen voor de ligger bekomen:

$$h_1 = \frac{l}{16} = \frac{18 \text{ m}}{16} = 1.125 \text{ m}$$

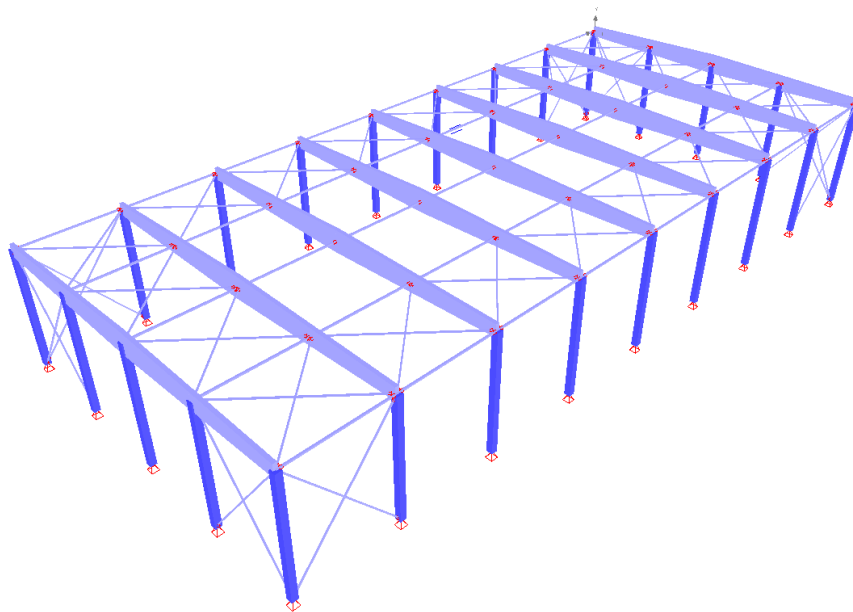
$$h_2 = \frac{l}{30} = \frac{18 \text{ m}}{30} = 0.6 \text{ m}$$

Figuur 27 geeft het ontwerp van de zadeldakligger weer met de afmetingen.



Figuur 27: Ontwerp zadeldakligger

De totale constructie met betonnen kolommen en houten zadeldakliggers is weergegeven in Figuur 28. Het ontwerp ziet er identiek hetzelfde uit als de staalstructuur aangezien de windverbanden en drukkokers op dezelfde plaats behouden blijven. Enkel de drukkokers in de langsevel zijn niet meer van toepassing omdat de betonnen kolommen wel voldoen aan de structurele eisen.



Figuur 28: Ontwerp betonstructuur met houten gelamelleerde liggers

3.5.2 Resultaten

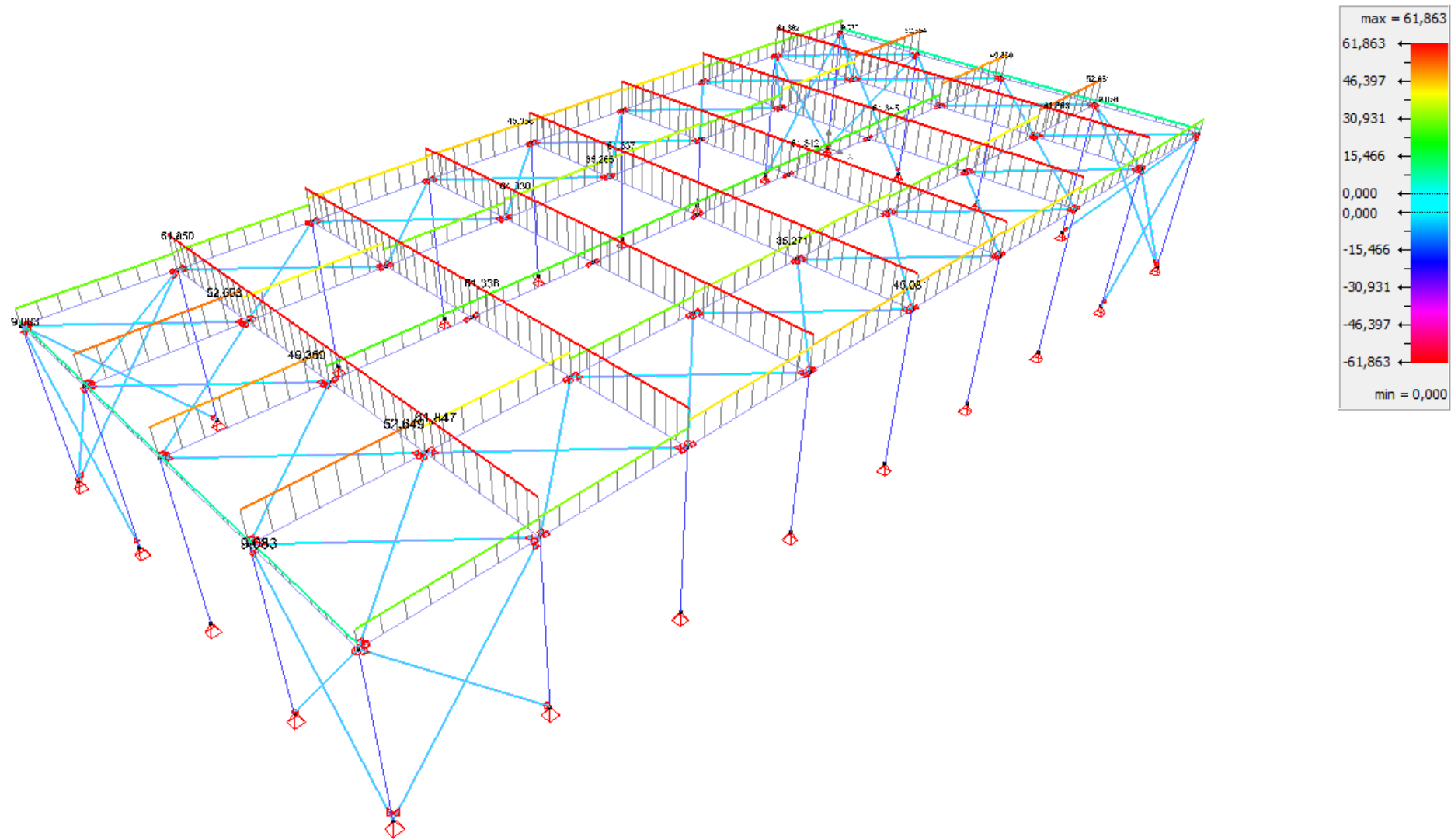
De belastingen op deze structuur zijn idem aan de belastingen op de staalstructuur. Dit met uitzondering van het eigengewicht van de profielen, hetgeen door *Diamonds* zelf in rekening wordt gebracht. Na de eerste-orde analyse en knikcontrole blijkt dat de structuur in het geheel voldoet. De doorbuiging in GGT heeft echter wel een relatief grote waarde, namelijk 76,9 mm. Deze doorbuiging mag geen effect hebben op het afvoeren van het regenwater. Aangezien de ligger een hoogteverschil heeft van 52,5 cm zal een doorbuiging van ongeveer 8 cm het afvoeren van het regenwater niet beletten.

Sterkte

De sterktecontrole in het rekenprogramma *Diamonds* heeft enkel betrekking op de materialen staal en hout. Hierdoor kunnen alleen de houten gelamelleerde liggers en de secundaire staalconstructie gecontroleerd worden. Figuur 29 geeft het resultaat van de sterktecontrole weer. Het maximum percentage van deze industriehal bedraagt 97% en bevindt zich aan de zijkanten van de liggers van de standaardportieken.

Stabiliteit

De stabiliteitscontrole in het rekenprogramma *Diamonds* heeft enkel betrekking op de materialen staal en hout. Hierdoor kunnen weer alleen de houten gelamelleerde liggers en de secundaire staalstructuur gecontroleerd worden. Figuur 30 geeft het resultaat van de stabiliteitscontrole weer. Zoals te zien in deze figuur is het maximale percentage 62%. De liggers van de standaardportieken zijn dus niet op de maximale capaciteit belast. Toch kunnen deze profielen niet lichter gemaakt worden omwille van de sterktecontrole zoals eerder aangegeven.



Figuur 30: Resultaat stabiliteitscontrole van de beton-houtconstructie

Berekenen wapeningssecties

De betonnen kolommen kunnen niet gecontroleerd worden met behulp van de sterkte- en stabiliteitscontrole. Deze elementen dienen echter gecontroleerd te worden op de benodigde wapening. In het analyseprogramma *Diamonds* wordt op basis van de gegeven doorsnede en belasting een minimumwapening voorgesteld. Deze is vereist om de belastingen in de uiterste grenstoestand te weerstaan. De berekening van de wapening leidt tot de volgende vier deelresultaten:

- Langswapening evenwijdig met de lokale y-as. Dit heeft betrekking tot de onder- en bovenwapening. De resultaten van dit deelresultaat wordt weergegeven in figuur 31;



- Langswapening evenwijdig met de lokale z-as. Dit heeft betrekking tot de flankwapening. De resultaten van dit deelresultaat wordt weergegeven in figuur 32;



- Dwarswapening evenwijdig met de lokale z-as. Dit heeft betrekking tot de verticale beugels. De resultaten van dit deelresultaat wordt weergegeven in figuur 33;



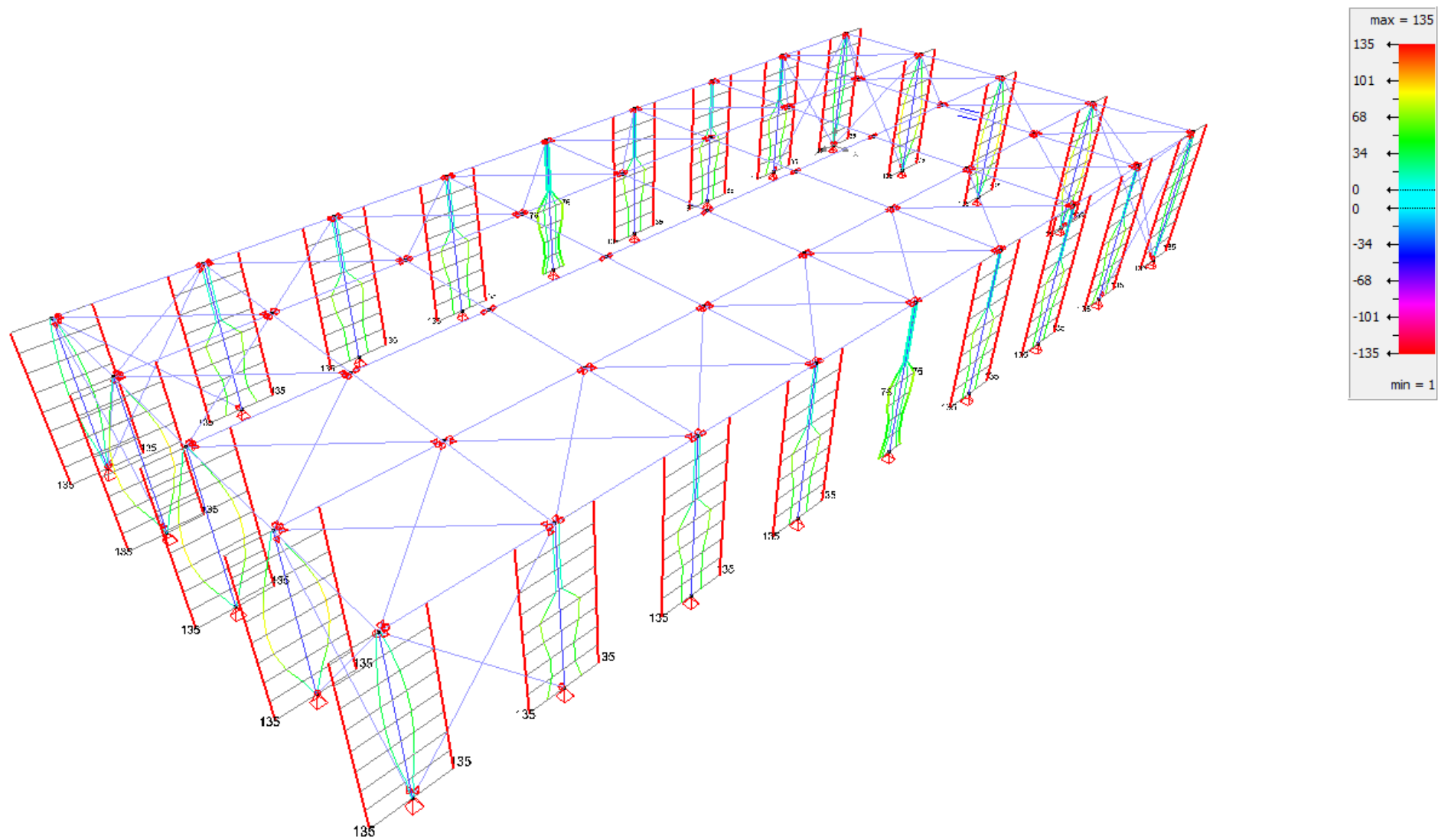
- Dwarswapening evenwijdig met de lokale y-as. Dit heeft betrekking tot de horizontale beugels. De resultaten van dit deelresultaat wordt weergegeven in figuur 34.



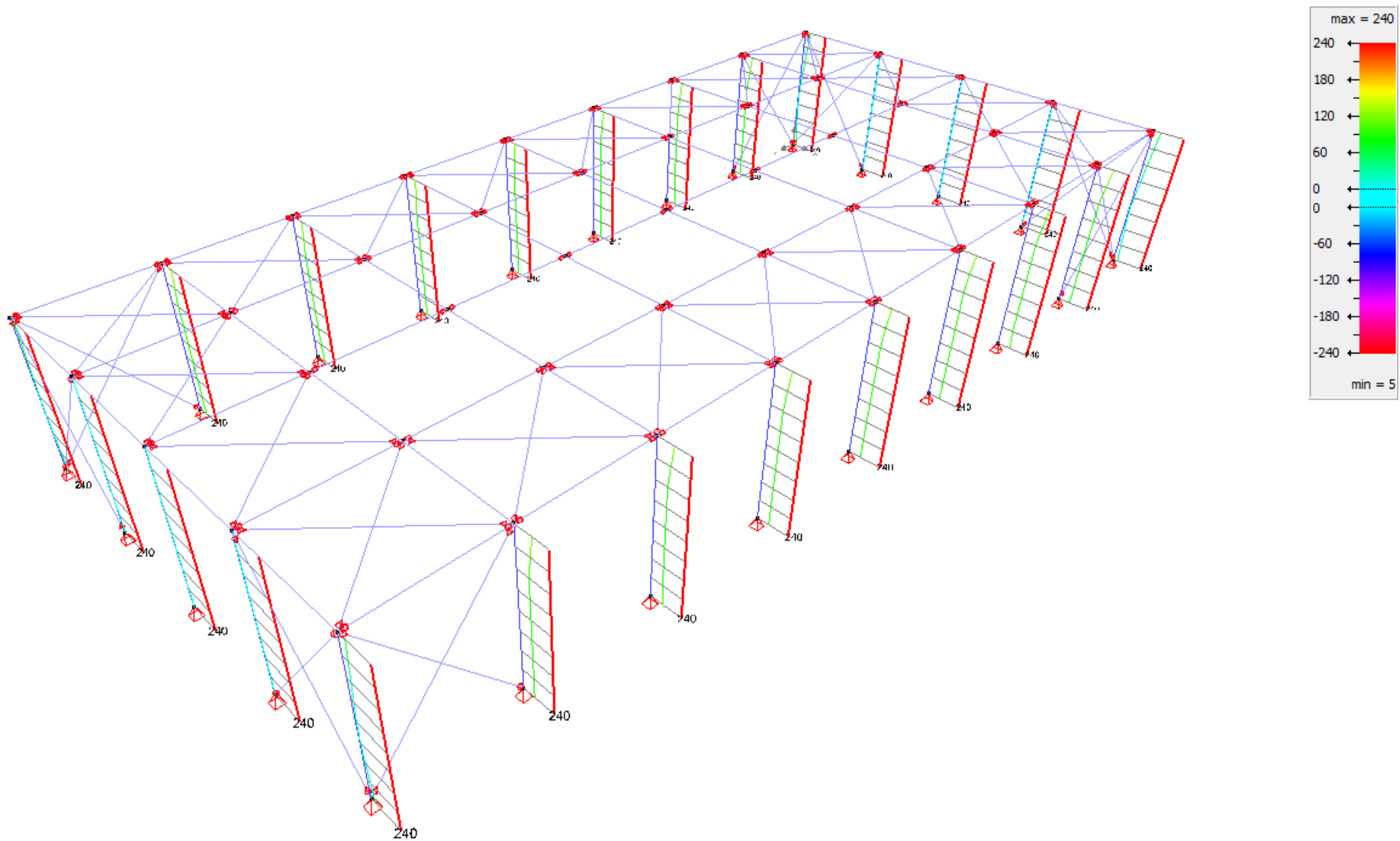
Om het aantal staven en de diameter ervan te bepalen kan gebruik gemaakt worden van volgende formule:

$$A_{wapening} = \frac{\pi * d^2}{4} * n$$

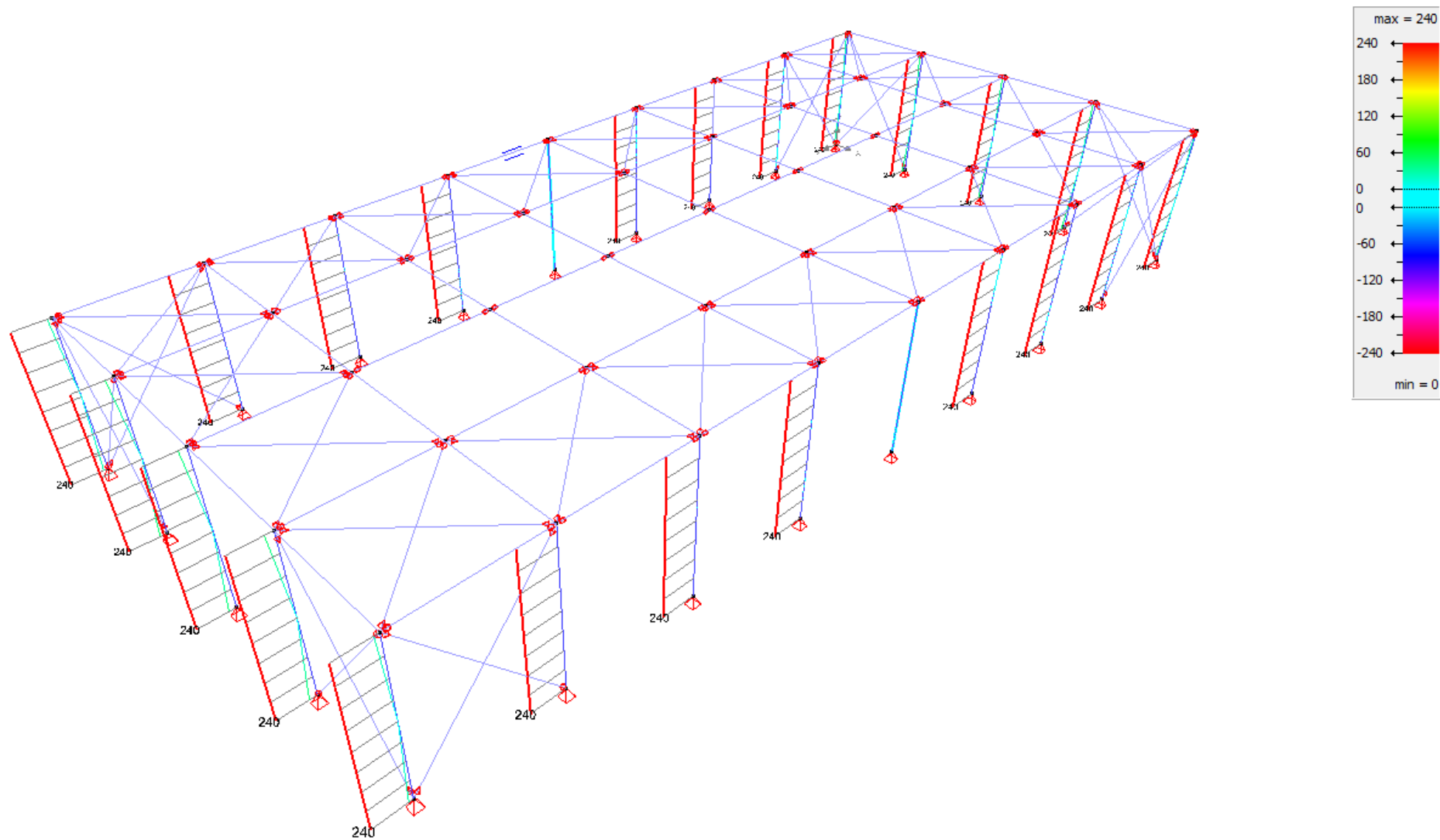
Wanneer het via deze formule bekomen wapeningsoppervlakte groter is dan de resultaten van *Diamonds* zal de balk of kolom voldoen. Een belangrijke opmerking is dat er rekening moet gehouden worden met de plaatsingsmogelijkheid van de staven. Er moet een minimale betondekking en een minimale tussenafstand tussen de wapeningsstaven voorzien worden. Hierdoor moet er gecontroleerd worden of de wapeningsstaven in het element passen.



Figuur 32: Resultaat langswaapening evenwijdig met lokale z-as van de beton-houtconstructie



Figuur 33: Resultaat dwarswapening evenwijdig met lokale z-as van de beton-houtconstructie



Figuur 34: Resultaat dwarswapening evenwijdig met lokale y -as van de beton-houtconstructie

3.5.3 Fundering

De berekening van de benodigde grootte van de fundering is analoog aan de staalconstructie (zie 3.4.3). In de langsgevel is de maximale verticale drukkracht 100.67 kN. De berekende afmetingen van de funderingszool bedragen dan 105 cm op 105 cm. De grootste drukkracht in de kopgevel bedraagt 55.96 kN. Hier voldoet een funderingszool met afmetingen van 90 cm op 90 cm.

3.5.4 Prijsbepaling

Om de kostprijs van de houten gelamelleerde liggers te bepalen, is er beroep gedaan op enkele offertes van verschillende aannemers. Om een zo realistisch mogelijke benadering te verkrijgen, wordt de gemiddelde prijs van deze offertes genomen. Hierdoor bedraagt de eenheidsprijs van de houten gelamelleerde liggers 641.48€/m³. Het volume hout van de liggers wordt berekend aan de hand van de afmetingen en het aantal liggers.

$$\text{Volume hout} = b * A * n = 0.18 \text{ m} * \left(0.60 \text{ m} * 9 \text{ m} + 0.5125 \text{ m} * 9 \frac{\text{m}}{2} \right) * 18 = 25.15 \text{ m}^3$$

Voor de betonnen kolommen is hetzelfde gedaan omdat hiervoor ook geen standaardprijs beschikbaar is. De eenheidsprijs bedraagt 715.958€/m³.

$$\text{Volume beton} = l * b * h * n = 0.30 \text{ m} * 0.30 \text{ m} * 6 \text{ m} * 24 = 12.96 \text{ m}^3$$

Er moet eveneens rekening gehouden worden met het wapeningsstaal. Er wordt rekening gehouden met de standaardhoeveelheden van de aannemers, namelijk 143.85 kg/(m³ beton).

$$\text{Hoeveelheid wapeningsstaal} = 143.85 \text{ kg}/(\text{m}^3 \text{ beton}) * 12.96 \text{ m}^3 = 1864.296 \text{ kg}$$

De drukkokers en windverbanden bestaande uit staal zijn wel met een eenheidsprijs van 2,00€/kg berekend. Net zoals bij de staalconstructie zijn de twee toeslagen in rekening gebracht.

Tabel 9 geeft een overzicht van de berekening van de totale kostprijs van de structuur weer. Deze bedraagt €38797,59.

Tabel 9: Prijsbepaling betonstructuur met houten gelamelleerde liggers

	Profiel	Hoeveelheid [m³]	Eenheidsprijs [€/m³]	Prijs [€]
Liggers (hout)	(18 cm) x (60 cm tot 112,5 cm)	25,151	641,48	16133,59
Kolommen (beton)	30cm x 30 cm	12,960	715,96	9278,82
Wapeningsstaal in kolom		1864,296	2,00	3728,59
Funderingszool	105cm x 105cm x 40cm	0,441	168,94	1043,04
	90cm x 90cm x 40cm	0,324	168,94	547,37
	Profiel	Hoeveelheid [kg]	Eenheidsprijs [€/kg]	Prijs [€]
Drukkokers (staal)	SHS 80*80*3	1414,20		
Windverband (staal)	L 60*60*6	2123,60		
Totaal (excl. toeslag)staal (kg)		3537,80		
Toeslag 1 (8%)		283,02		
Toeslag 2 (6%)		212,27		
Totaal staal (kg)		4033,09	2,00	8066,18
			TOTALE PRIJS [€]	38797,59

3.6 Geprefabriceerde betonstructuur

3.6.1 Ontwerp

Het ontwerp van de industriehal bestaande uit geprefabriceerd beton bevat voorgespannen IV-liggers en gewapend betonnen kolommen. De kolommen hebben een vierkante doorsnede met als afmetingen 25x25cm. De IV-liggers hebben een I-vormige doorsnede en zijn dus vergelijkbaar met een stalen IPE-profiel, met als verschil dat de IV-liggers geen constante hoogte hebben. Figuur 35 geeft een voorbeeld van een industriehal met voorgespannen IV-liggers weer.



Figuur 35: Voorgespannen IV-liggers in geprefabriceerd beton [5]

De afmetingen van de liggers zijn afhankelijk van de overspanning en de optredende belastingen, exclusief het eigengewicht. Tabel 10 geeft de mogelijke overspanningen in functie van de hoogte van de profielen.

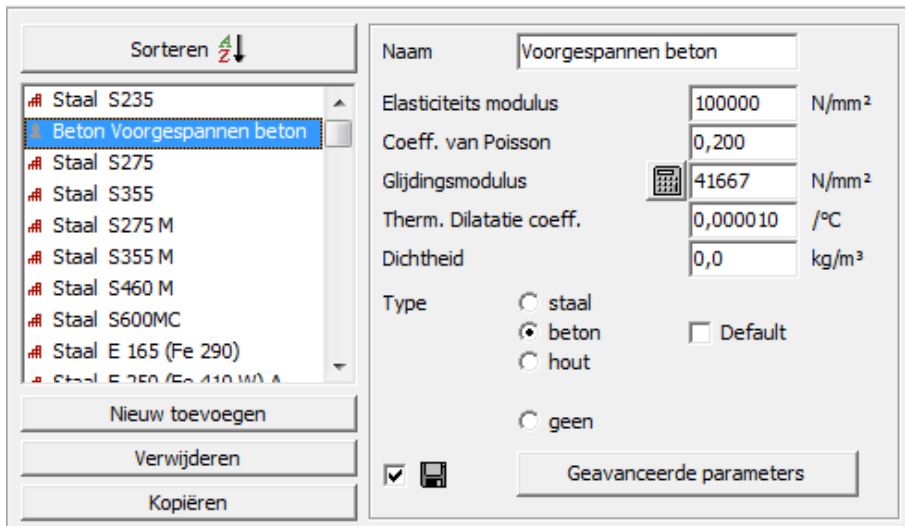
Tabel 10: Mogelijke overspanningen geprefabriceerde liggers [17]

Hoogte [cm] midden	Breedte [cm] flenzen	Lijfdikte [cm]	Overspanning [m]
70-100	30-37,5	8-13	8-24
80-150	35-45	8-13	16-32
120-270	40-60	8-13	20-50

Voor de standaard industriehal is een IV 40/100 - 5% toegepast. Deze naamgeving is opgebouwd uit vier componenten: profieltype, breedte ligger, midden hoogte ligger en dakhelling. De overige afmetingen zijn weergegeven in bijlage 1.

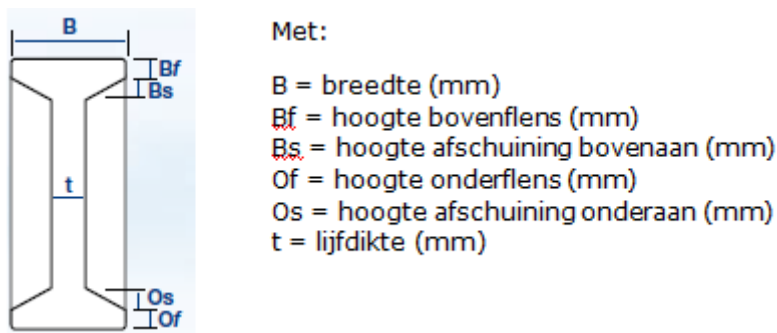
Het invoeren van dergelijke liggers in *Diamonds* dient op een andere manier te gebeuren dan het invoeren van stalen of houten elementen, vermits spanbeton niet standaard in de materiaal bibliotheek van *Diamonds* is opgenomen. Daardoor dient spanbeton zelf aangemaakt te worden in *Diamonds*. Bij deze toevoeging worden er drie eigenschappen handmatig ingegeven. Ten eerste wordt de elasticiteitsmodulus ingegeven. Deze heeft een waarde van 100000 N/mm². Dit is een relatief hoge waarde

omdat deze drie keer zo groot als de elasticiteitsmodulus van normaal beton. Bijgevolg blijven de vervormingen beperkt. Een tweede eigenschap die wordt ingegeven, is de coëfficiënt van Poisson. Deze coëfficiënt heeft een waarde van 0.2 en is gelijk aan die van normaal beton. Ten laatste dient de dichtheid van spanbeton ingevoerd te worden. Deze wordt aangenomen als 0.0 kg/m³. Dit wil zeggen dat een element in spanbeton, onafhankelijk van de afmetingen een gewicht van 0 kg heeft. De toevoeging van spanbeton in *Diamonds* is weergegeven in figuur 36.



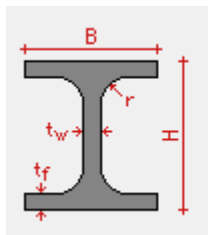
Figuur 36: Toevoeging nieuw materiaal "voorgespannen beton" in de materiaal bibliotheek van *Diamonds*

Nadat het nieuwe materiaal is aangemaakt, kunnen de liggers ontworpen worden. Deze hebben een doorsnede, dat weergegeven is in figuur 37.



Figuur 37: Doorsnede IV-ligger

In *Diamonds* is het echter niet mogelijk om de IV-liggers volgens deze doorsnede te dimensioneren. Als alternatief is er geopteerd voor de doorsnede van een stalen I-profiel, aangezien deze een overeenkomstige vorm heeft met de werkelijke doorsnede van de IV-liggers. Deze doorsnede is weergegeven in figuur 38. Nochtans is er een verschil tussen beide doorsneden. De werkelijke doorsnede van de IV-liggers bevat een afschuining tussen de flens en het lijf, terwijl de doorsnede in *Diamonds* een kromming bevat. Om deze afschuiving in *Diamonds* na te bootsen, wordt de kromtestraal van het profiel op een maximale waarde ingesteld. Deze waarde bedraagt 150mm.



Met:

- B = breedte (mm)
- H = hoogte profiel (mm)
- t_f = hoogte flens (mm)
- t_w = lijfdikte (mm)
- r = kromtestraal (mm)

Figuur 38: Doorsnede IV-ligger in Diamonds

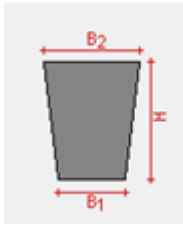
Deze elementen hebben echter nog geen eigengewicht, vermits de dichtheid van spanbeton ingesteld is op 0.0 kg/m³. Theoretisch gezien is het onmogelijk dat een element bestaande uit een materiaal geen eigengewicht heeft. Als oplossing wordt het eigengewicht van de voorgespannen liggers, die weergegeven zijn in bijlage 1, ingegeven als permanente last. Hierdoor wordt het eigengewicht van de liggers onrechtstreeks in rekening gebracht. Deze voorgespannen liggers worden enkel toegepast in de portieken in de langsevel. Voor de kopgevel wordt een gewapend betonnen balk gebruikt met afmetingen 200x300mm, omdat deze ligger op meerdere plaatsen ondersteund wordt door gewapend betonnen kolommen.

In geval van geprefabriceerde betonnen liggers, is het niet altijd noodzakelijk om windverbanden en drukkokers te voorzien in de structuur. Op de liggers bevindt zich een stortlaag van beton tot aan de dakstructuur. Als deze stortlaag op twee liggers aanwezig is, zullen deze liggers samen werken als één schijf. Deze schijfwerking zorgt voor de horizontale stabiliteit van de structuur. De omcirkelde delen in figuur 39 zijn de stortlagen op de liggers. In dit onderzoek worden echter wel windverbanden gebruikt, opdat de dakstructuur hetzelfde blijft. In geval van een betonnen stortlaag zal de dakstructuur ook in beton worden uitgevoerd, dat vervolgens leidt tot andere belastingen op de constructie. Als windverbanden worden dezelfde profielen gebruikt als bij de industriehal uit staal.



Figuur 39: Stortlaag beton op liggers [18]

In plaats van stalen drukkokers worden er gewapend betonnen dakgordingen gebruikt. Figuur 40 geeft de doorsnede en bijhorende afmetingen weer.



Met:

B1 = 180 mm

B2 = 220 mm

H = 290 mm

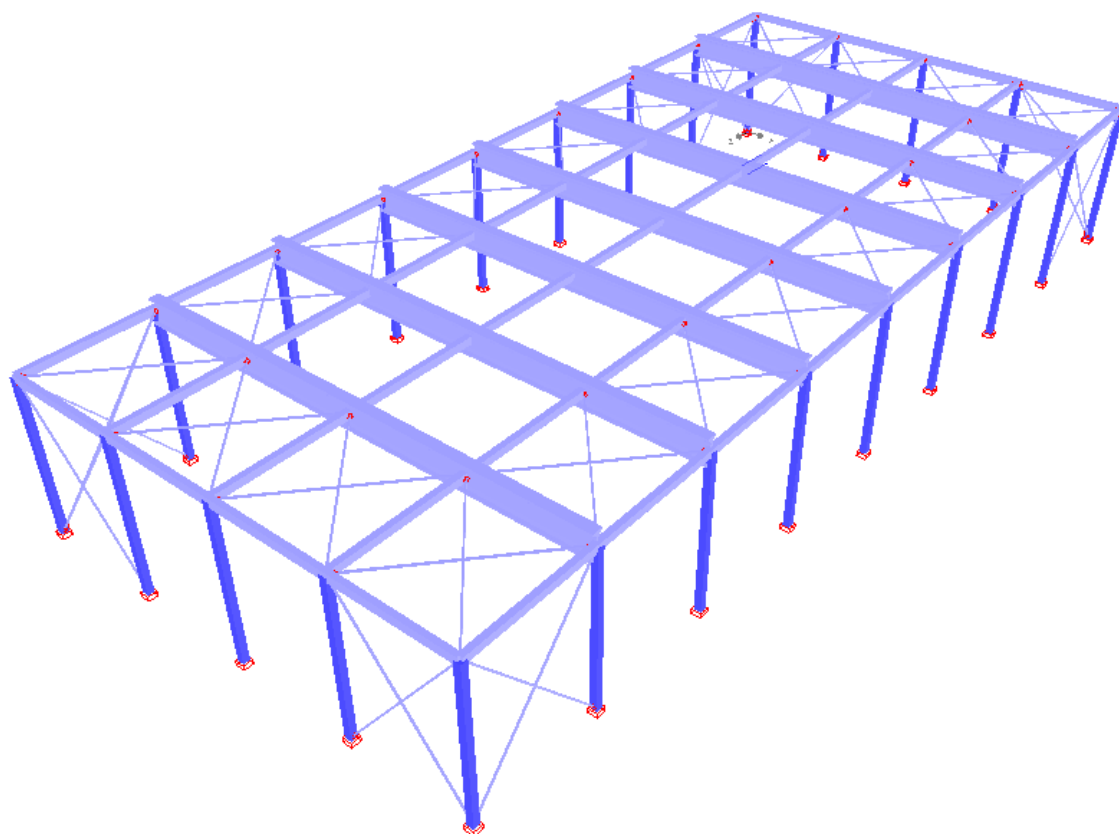
Figuur 40: Doorsnede en afmetingen van betonnen dakgordingen [5]

Tabel 11 geeft de toegepaste betonnen elementen weer.

Tabel 11: Profiel betonnen elementen

Element	Profiel
Voorgespannen ligger	IV 40/100 - 5%
Kopligger	BM 200/300
Kolom	KM 250/250
Gordingen	Zie figuur 40
Windverbanden	L 60x60x6

Het uiteindelijke ontwerp van de industriehal in geprefabriceerd beton is getoond in figuur 41.



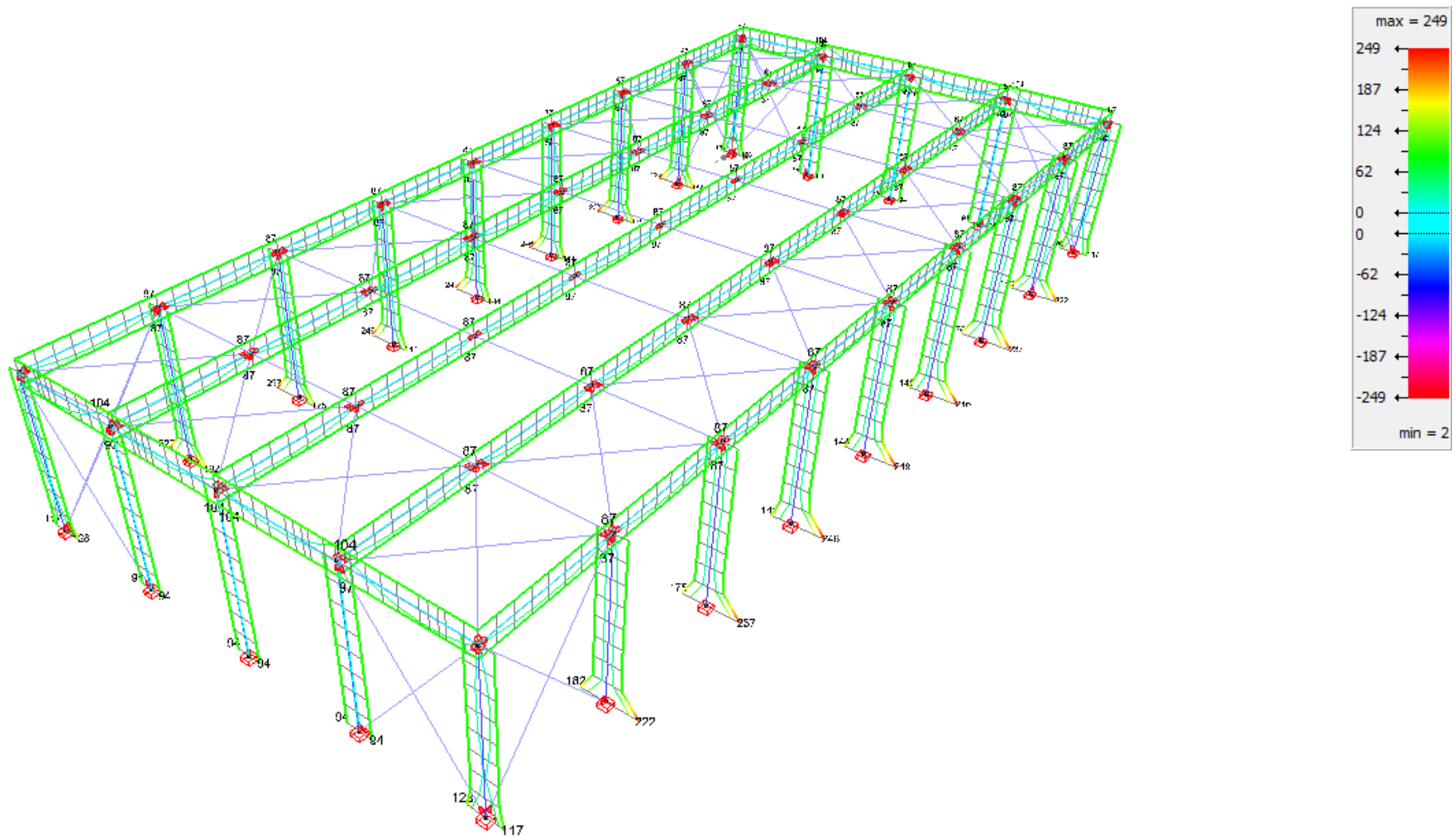
Figuur 41: Ontwerp geprefabriceerde betonstructuur

3.6.2 Resultaten

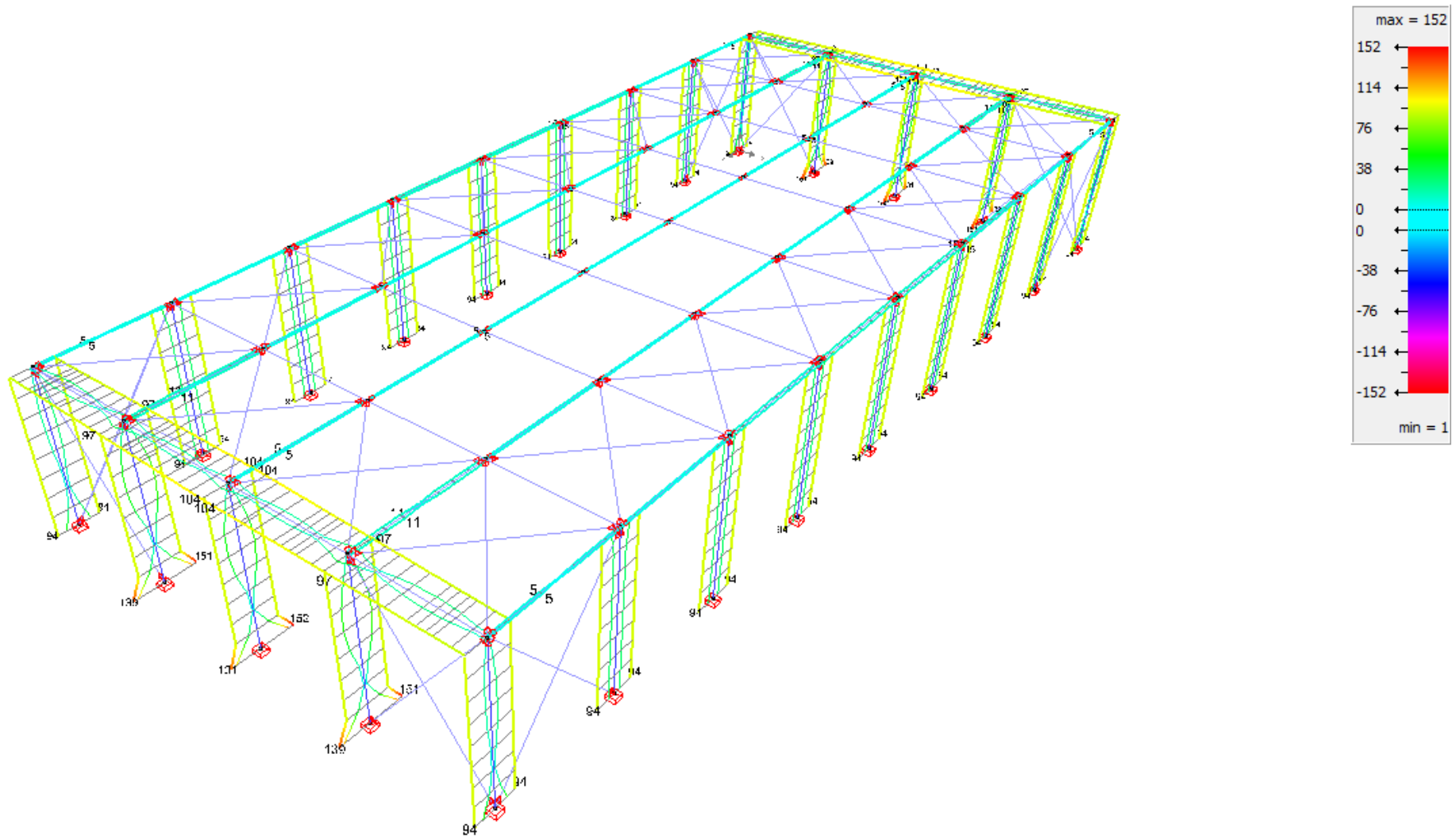
Voor deze constructie dient enkel de hoeveelheid wapening per element berekend te worden, vermits de constructie hoofdzakelijk bestaat uit beton. Er is evenzeer een sterkte- en stabiliteitscontrole uitgevoerd ter controle van de windverbanden. Hieruit blijkt dat de windverbanden de optredende belastingen weerstaan.

Wapening

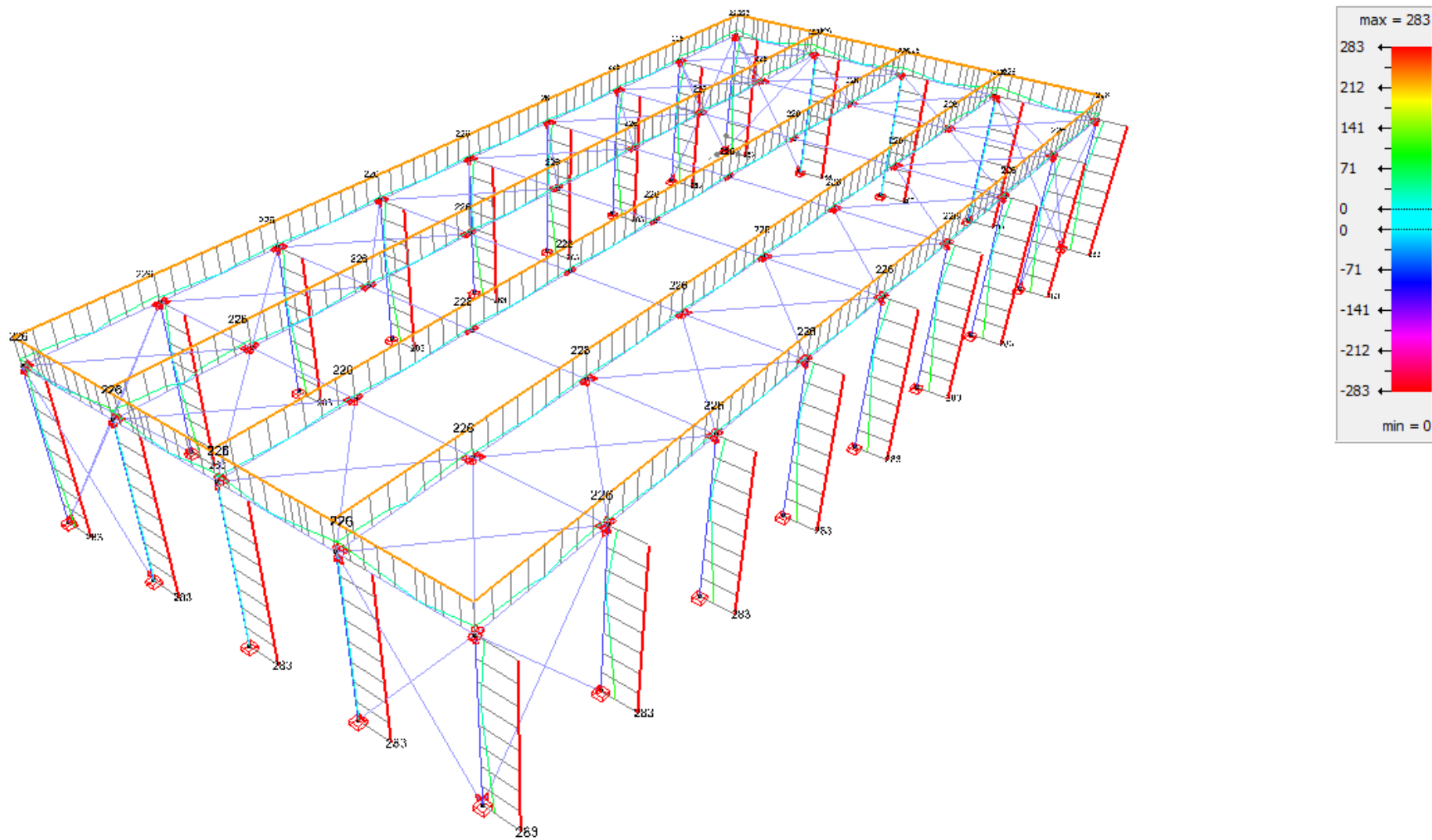
De wapeningsberekening is analoog aan de betonstructuur met houten gelamelleerde liggers. De resultaten van deze berekening zijn weergegeven in figuren 42-45. In deze resultaten is te zien dat de voorgespannen betonnen liggers niet opgenomen zijn in de wapeningsberekening. Dit is omdat het materiaal van deze liggers zelf aangemaakt is en de wapening verrekend is in de ingevoerde eigenschappen.



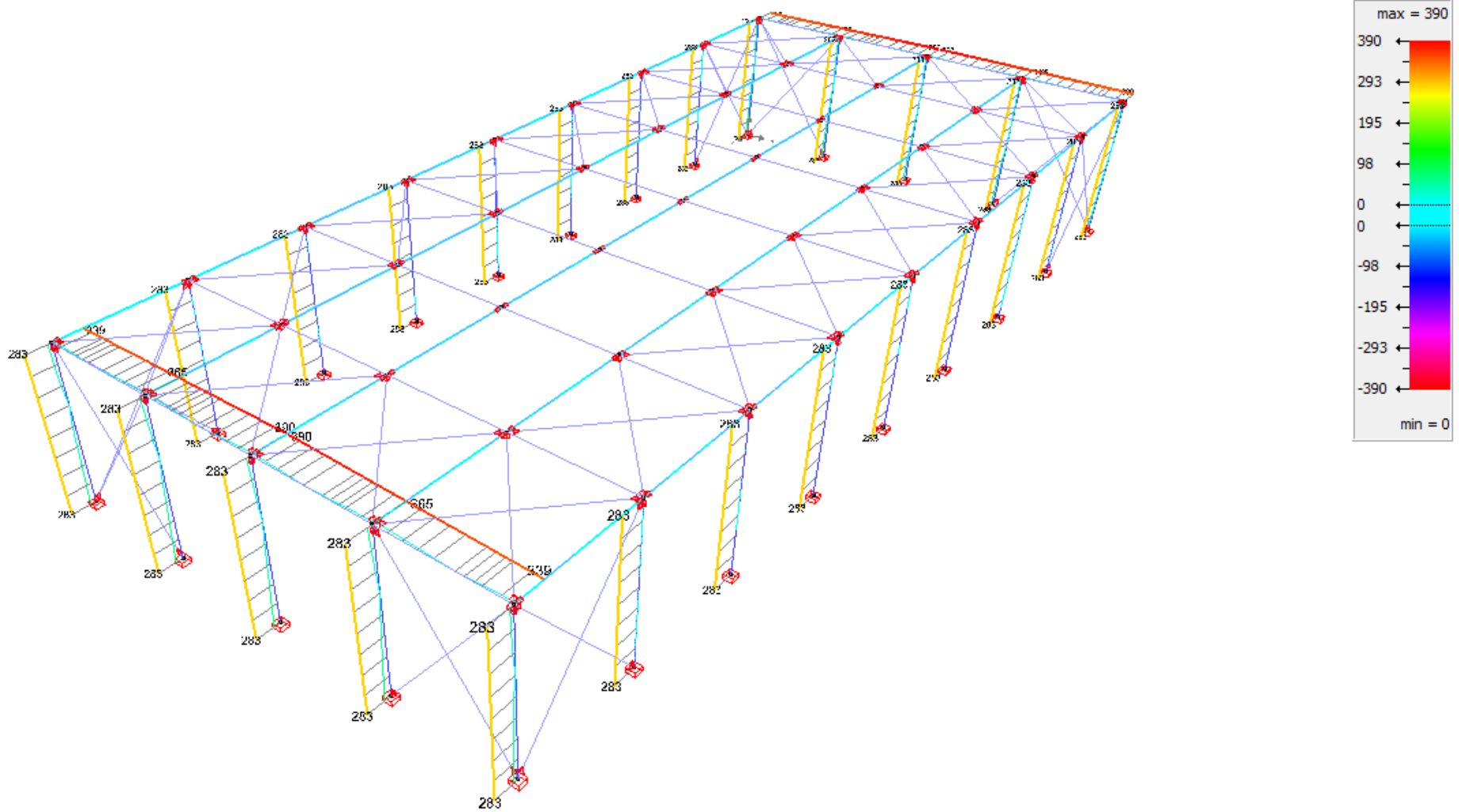
Figuur 42: Resultaat langswapening evenwijdig met lokale y-as van de geprefabriceerde betonconstructie



Figuur 43: Resultaat langswapening evenwijdig met lokale z-as van de geprefabriceerde betonconstructie



Figuur 44: Resultaat dwarswapening evenwijdig met lokale z-as van de geprefabriceerde betonconstructie



Figuur 45: Resultaat dwarswapening evenwijdig met lokale y-as van de geprefabriceerde betonconstructie

3.6.3 Fundering

De berekening van de benodigde grootte van de fundering is analoog aan de staalconstructie (zie 3.4.3). In de langs gevel is de maximale verticale drukkracht 162.86 kN. De berekende grootte bedraagt dan 130 cm op 130 cm. De grootste drukkracht in de kopgevel bedraagt 55.67 kN. Hier voldoet een funderingszool van 90 cm op 90 cm.

3.6.4 Prijsbepaling

Om de kostprijs van de voorgespannen betonnen liggers te bepalen, werd een afspraak gemaakt met Joris Cools, afdelingshoofd studiedienst bij Willy Naessens Industriebouw. Hij heeft twee kostprijzen per overspanning berekend. Om een zo realistisch mogelijke benadering te krijgen, wordt de gemiddelde kostprijs hiervan berekend. De geraamde kostprijs van een voorgespannen betonnen ligger met een overspanning van 18 meter bedraagt €2527.50. [18]

De kostprijs van de gewapend betonnen kolommen wordt berekend aan de hand van de afmetingen en het aantal kolommen. De eenheidsprijs is berekend op basis van enkele offertes van verschillende aannemers. Hiervan is eveneens het gemiddelde genomen. De eenheidsprijs van betonnen kolommen bedraagt 715.958 €/m³.

$$\text{Volume betonnen kolommen} = l * b * h * n = 0.25 \text{ m} * 0.25 \text{ m} * 6 \text{ m} * 24 = 9 \text{ m}^3$$

De kostprijs van de gewapend betonnen balken en dakgordingen worden op dezelfde manier als de kolommen bepaald. De eenheidsprijs van deze elementen bedraagt 614.122 €/m³.

$$\text{Volume betonnen balken} = 2.16 \text{ m}^3$$

$$\text{Volume betonnen dakgordingen} = 11.6 \text{ m}^3$$

Er moet eveneens rekening gehouden worden met het wapeningsstaal. Aangezien de wapening niet exact bepaald is wordt er rekening gehouden met de standaardhoeveelheden van de aannemers, namelijk 143.85 kg/(m³ beton).

$$\begin{aligned} \text{Hoeveelheid wapeningsstaal} &= 143.85 \text{ kg}/(\text{m}^3 \text{ beton}) * (9 + 2.16 + 11.6) \text{ m}^3 \\ &= 3274.026 \text{ kg} \end{aligned}$$

De windverbanden bestaande uit staal zijn wel met een eenheidsprijs van 2€/kg berekend. Net zoals bij de staalconstructie zijn de twee toeslagen in rekening gebracht.

Tabel 12 geeft een overzicht van de berekening van de totale kostprijs van de structuur weer. Deze bedraagt €45527.91.

Tabel 12: Prijsbepaling geprefabriceerde betonstructuur

	Profiel	Hoeveelheid [m³]	Eenheidsprijs [€/m³]	Prijs [€]
Kolommen	KM 250*250	9,000	715,958	6443,62
Balken	BM 200*300	2,160	614,122	1326,50
	Gording	11,600	614,122	7123,82
Voorgespannen liggers	IV 40/100 - 5%	18,515	2527,50	17692,50
Wapeningsstaal in balk		1979,376	2,00	3958,75
Wapeningsstaal in kolom		1294,650	2,00	2589,30
Funderingszool	130cm x 130cm x 40cm	0,676	168,94	1598,85
	90cm x 90cm x 40cm	0,324	168,94	547,37
	Profiel	Hoeveelheid [kg]	Eenheidsprijs [€/kg]	Prijs [€]
Windverband (staal)	L 60*60*6	2123,60	2,00	4247,20
			TOTALE PRIJS (€)	45527,91

3.7 Prijsvergelijking

Wanneer er wordt gekozen voor een industriehal te bouwen met een overspanning van 18 meter, zal de industriehal met houten gelamelleerde liggers en betonnen kolommen economisch het meest voordelig zijn. Hierbij wordt enkel rekening gehouden met een standaard dakbedekking en zonder speciale extra belastingen. De prijs van de prefab betonstructuur ligt tussen de andere twee prijzen zoals te zien in tabel 13.

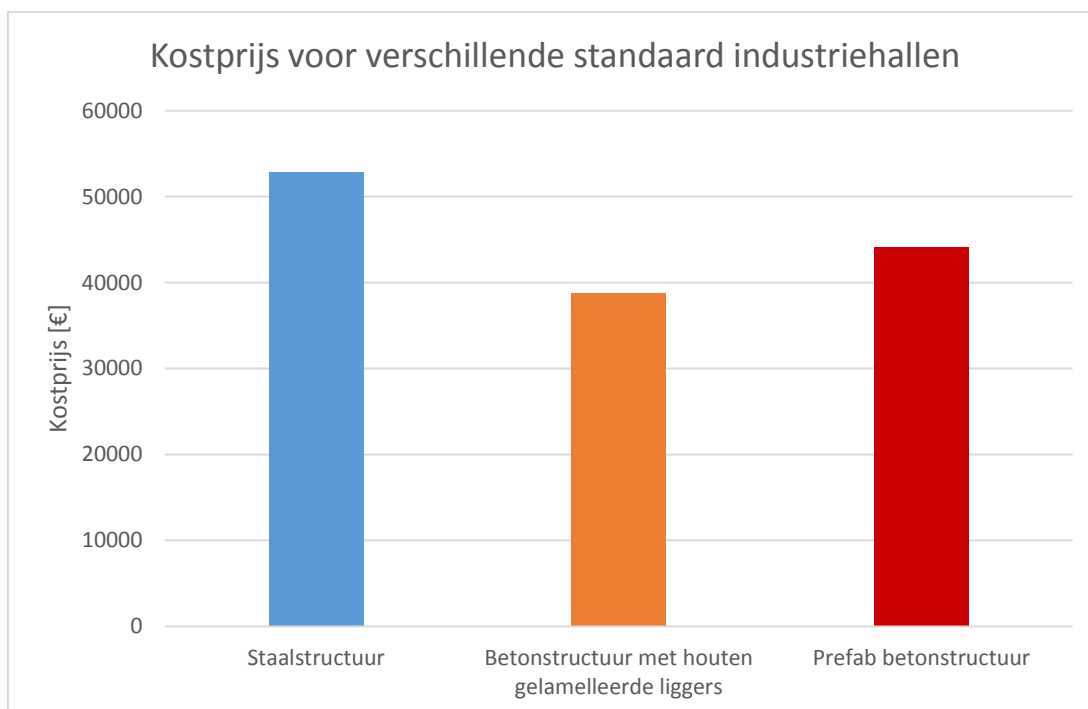
In tegenstelling tot wat verwacht wordt, is staal niet het economisch beste materiaal. Dit kan enigszins verklaard worden door de variabele dagprijs van het staal. De aankoopprijs van het staal hangt eveneens af van de hoeveelheid staal dat wordt aangekocht. Op basis van dit resultaat kan besloten worden dat in de toekomst het wellicht minder voordelig is om stalen industriehalen te bouwen en meer en meer gebruik gemaakt kan worden van andere materialen zoals in dit geval houten gelamelleerde liggers. De reden waarom er toch nog vaak gekozen wordt om een industriehal in staal te ontwerpen is de snelle bouwtijd, aangezien de constructie ter plaatse van de werf snel opgebouwd kan worden.

De gedetailleerde rekennota's van de verschillende standaard industriehallen uit *Diamonds* zijn terug te vinden in bijlage 10.

Tabel 13: Prijsvergelijking standaardhal

Soort industriehal	Kostprijs[€]
Staalstructuur	52919,93
Betonstructuur met houten gelamelleerde liggers	38797,59
Geprefabriceerde betonstructuur	46122,51

Figuur 46 geeft een duidelijke weergave van de prijzen van de drie verschillende industriehallen.



Figuur 46: Kostprijs voor verschillende standaard industriehallen

4 Industriehal met variabele overspanning

4.1 Ontwerp

Voor de vergelijking van de verschillende industriehallen zal de overspanning van de portieken gaan variëren. Deze overspanning varieert van 15 meter tot 30 meter en voor iedere meter wordt de kostprijs berekend voor de verschillende materialen. Voor de berekening is er geopteerd om enkel twee portieken van de volledige industriehal te berekenen, het portiek van de kopgevel en een standaardportiek. Enkel bij de randgevallen (15 meter en 30 meter) is de volledige industriehal bekeken. Voor de staalconstructie wordt bij een overspanning van 20 meter en 21 meter eveneens de volledige industriehal berekend, omdat bij deze overspanningen omgeschakeld wordt van vollewandligger naar een vakwerkligger. Om een standaardportiek te berekenen wordt er gekozen voor de middelste portiek van de structuur. Dit portiek neemt een bepaalde belasting op gelijkaardig als het portiek in de volledige structuur. Ook het portiek van de kopgevel wordt voor iedere overspanning apart uitgerekend aangezien er in dit portiek meerdere kolommen aanwezig zijn. Hierdoor zal de puntlast op de fundering kleiner worden. Vervolgens kan de fundering kleiner worden waaruit een lagere prijs volgt.

Om de drukkokers en windverbanden bij het berekenen in rekening te brengen worden de punten waar de drukkokers aangrijpen vast gemaakt in de z-richting. Hierdoor zullen deze punten niet kunnen vervormen in deze richting, wat neerkomt op dezelfde functie van de drukkokers en windverbanden. De tussenafstand van de drukkokers mag maximaal 6 meter bedragen. De reden hiervoor is het optimaal functioneren van de krachtsafdracht en de mogelijkheid tot plaatsing van geprofileerde dakplaten. Voor de overspanningen van 15 tot 24 meter, worden de portieken opgedeeld in vier velden. Vanaf een overspanning van 25 meter dienen de portieken opgedeeld te worden in zes velden, zodat de maximale tussenafstand van de drukkokers niet overschreden wordt.

Er is een aanname gemaakt met betrekking tot de windverbanden. Deze kunnen niet in rekening worden gebracht als er enkel één portiek wordt uitgerekend. Om de horizontale stabiliteit te garanderen worden de hoekpunten van het portiek vast gemaakt in de x-richting. Het volledige ontwerp van de industriehal bij de randgevallen houdt wel rekening met de windverbanden. Aangezien deze voldoende sterk zijn, zal deze bij de tussenmaten ook voldoen aan de eisen. Bij de prijsbepaling worden deze windverbanden natuurlijk wel in rekening gebracht.

4.2 Staalstructuur

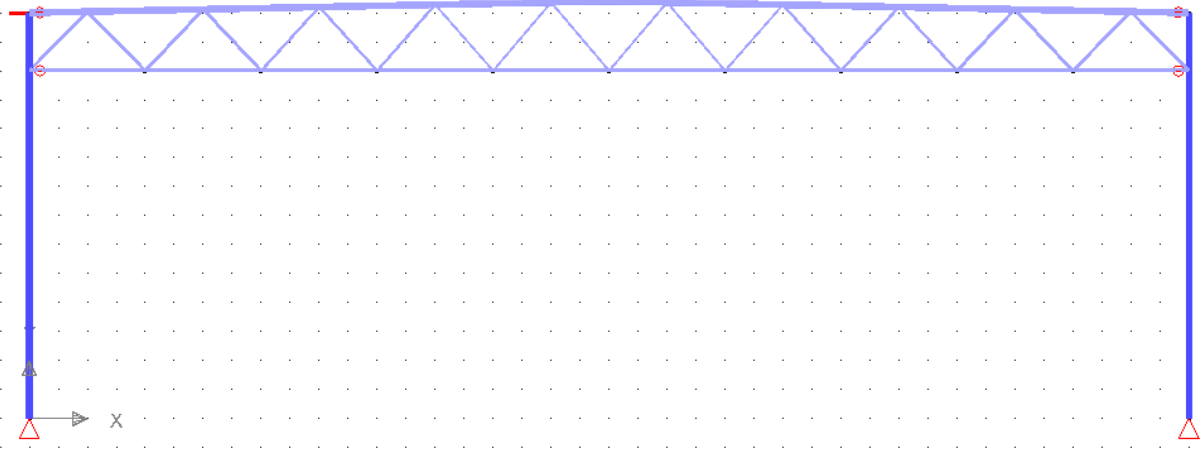
De berekening van de industriehal met variabele overspanning is analoog met de berekening van de standaardhal. Voor een overspanning tot 21 meter kan er gebruik gemaakt worden van vollwandliggers. Vanaf 21 meter is het voordeliger om een vakwerk uit te rekenen. Dit heeft te maken met de transport -en uitvoeringsmogelijkheden van de stalen liggers.

Tabel 14 geeft de profielen voor de industriehallen tot 21 meter weer. De tussenkolommen zijn de kolommen die zich in de kopgevel bevinden. Op basis van deze profielen en de lengte ervan kan de prijsbepaling gemaakt worden. Het profiel van de kopligger is in ieder geval een HEA220, dit aangezien de overspanning telkens gelijkwaardig is. De langsliggers zijn IPE profielen maar hebben grotere afmetingen. Dit is te wijten aan de hogere belasting op deze profielen, omdat de belasting langs twee kanten wordt afgedragen. De keuze om op de kopligger een HEA profiel te nemen heeft te maken met de optredende windbelasting. Deze belasting staat in een andere richting dan de dakbelasting. Als een IPE profiel gekozen zou worden zou dit veel groter gedimensioneerd moeten worden door het feit dat het profiel slanker is en een kleiner traagheidsmoment heeft in de zwakke as. Dit is ook terug te zien bij de kolommen. De hoekkolommen worden in twee richtingen belast, waardoor de zwakke as een groter traagheidsmoment nodig heeft. De andere kolommen kunnen gedraaid worden, waardoor de sterke as in de richting van de belasting kan staan. Gedetailleerde gegevens van deze profielen zijn terug te vinden in bijlage 2.

Tabel 14: Profielen staal bij variabele overspanning

Overspanning [m]	Profiel kopligger	Profiel kopkolom	Profiel hoekkolom	Profiel langsligger	Profiel langskolom
15	HEA220	IPE200	HEA120	IPE360	IPE330
16	HEA220	IPE200	HEA120	IPE360	IPE360
17	HEA220	IPE220	HEA120	IPE400	IPE360
18	HEA220	IPE220	HEA120	IPE400	IPE450
19	HEA220	IPE220	HEA120	IPE450	IPE450
20	HEA220	IPE220	HEA120	IPE450	IPE450

Voor de grotere overspanningen wordt er zoals aangegeven gewerkt met vakwerkstructuren. Om een vakwerk te ontwerpen zijn er verscheidene mogelijkheden. Figuur 47 geeft het ontwerp weer dat toegepast zal worden voor de hogere overspanningen. De optimale hoek binnen een vakwerk bedraagt 45°. Als de hoek kleiner is als deze waarde, zal het vakwerk een vlakkere structuur krijgen en hierdoor zal het minder optimaal functioneren. Door deze optimale hoek zijn er in praktijk een groter aantal staven in de structuur, maar deze kunnen lichter gedimensioneerd worden waardoor het uiteindelijk toch voordeliger is.



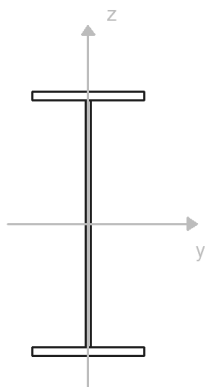
Figuur 47: Vakwerkstructuur

4.2.1 Keuze oriëntatie profielen

In een vakwerkstructuur moet er rekening gehouden worden met de oriëntatie van de verschillende profielen. Indien dit niet correct gebeurt, bestaat er een kans op knik van de staven of overdimensionering van deze staven.

Bovenligger van het vakwerk

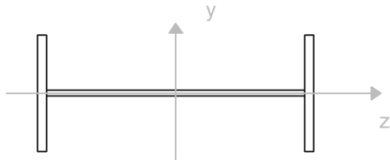
Een eerste optie voor de bovenligger van het vakwerk te dimensioneren is een IPE, HEA of HEB profiel. Het probleem dat hierbij optreedt, is het knikverschijnsel in de zwakke richting van het profiel. De bovenligger is steeds verticaal ondersteund door de schuine vakwerkstaven. In dit geval (figuur 48) zal het vakwerk dus in de sterke richting (y -richting) meer gesteund worden. In de zwakke richting (z -richting) zullen enkel de drukkokers zorgen voor een vermindering van de kniklengte. Een nadeel aan deze uitvoeringswijze is dus dat de profielen overgedimensioneerd zijn in de sterke richting om deze te optimaliseren in zwakke richting.



Figuur 48: IPE 450 normaal

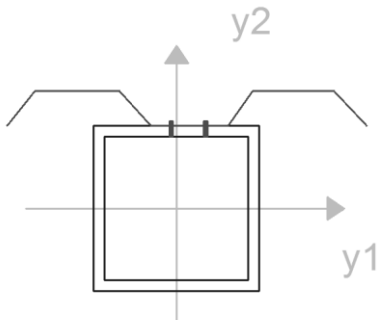
Om dit probleem op te lossen kan het profiel gedraaid worden zoals te zien in figuur 49. Het knikprobleem in zwakke richting wordt aanzienlijk verminderd door de vakwerkstaven. Een probleem dat hierbij optreedt, is het bevestigen van de sandwichpanelen op deze liggers. De sandwichpanelen worden normaal via nagels in de liggers geschoten waardoor ze vast komen te zitten. Indien er gebruik wordt gemaakt van een gedraaid IPE, HEA of HEB profiel zal er eerst nog een extra profiel voorzien

moeten worden zodat de platen bevestigd kunnen worden. Dit profiel kan een L-ijzer zijn of een kleine plaat die gelast wordt op het profiel. Nadeel hieraan is niet louter het extra staal, dit helpt ook mee aan de sterkte van het profiel. Wel betreft het hier steeds een extra handeling die moet worden uitgevoerd bij het fabriceren van de liggers.



Figuur 49: IPE 450 gedraaid

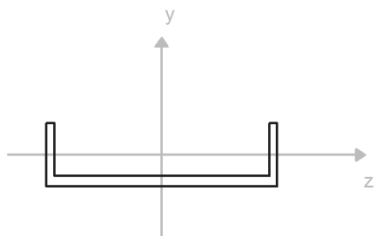
De oplossing die hier wordt gehanteerd is een holle koker. Een holle koker is vierkant waardoor er het profiel in beide richtingen even sterk is. Hierdoor vervalt het probleem van de ondersteuning in de zwakke richting. Omdat het profiel vierkant is en dus vlak van boven, kunnen de sandwichpanelen ook eenvoudig bevestigd worden op dit profiel zoals te zien in figuur 50.



*Figuur 50: SHS 150*150*10 met sandwichpaneel*

Onderligger van het vakwerk

Bij de onderligger zijn er geen drukkokers aanwezig. De kniklengte wordt enkel beperkt langs boven door de vakwerkstaven. Een gedraaid UPN profiel biedt de ideale oplossing voor een onderligger, figuur 51. Het traagheidsmoment in de sterke richting is tot 10 keer groter dan het traagheidsmoment in de zwakke richting. Hierdoor ontstaat er geen knikprobleem in de sterke richting waar geen steunen voorzien zijn. In de zwakke richting zorgen de vakwerkstaven voor voldoende ondersteuning.



Figuur 51: UPN profiel gedraaid

Overige staven van het vakwerk

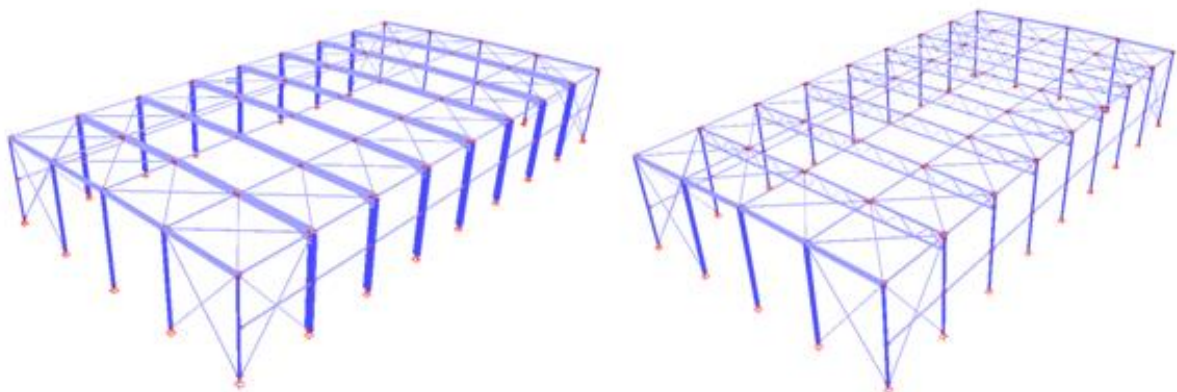
De schuine staven in de vakwerkstructuur zijn eveneens SHS-profielen. Deze staven kunnen trek –of drukstaven zijn, afhankelijk van de opgelegde belasting en vorm van het vakwerk. Bij iedere staaf kan in het geval van een drukstaaf het knikprobleem optreden. Indien het een trekstaaf is, kan er geen knik optreden. Er is niet gekozen voor IPE-profielen aangezien deze te zwaar zouden zijn, zeker wanneer de staaf niet op druk wordt belast.

Alle profielen met gewichten van de vakwerkstructuren zijn terug te vinden in bijlage 3.

4.2.2 Prijsbepaling

De overspanningen tot en met 20 meter worden bepaald op dezelfde wijze als de standaardhal, met een eenheidsprijs van 2,00€/kg staal. Voor de prijsbepaling van vakwerkstructuren dient er gerekend te worden met een andere eenheidsprijs. De eenheidsprijs van €2,00/kg geldt hier dus niet meer. De reden hiervoor is dat de productietijd van een vakwerkligger hoger ligt dan bij een vollewandligger bij eenzelfde overspanning. De nieuwe eenheidsprijs wordt bepaald op basis van de verhouding tussen de gewichten van een industriehal met vollewandliggers en een industriehal met vakwerkliggers. In deze gewichten zijn enkel de liggers inbegrepen, aangezien de overige elementen niet relevant zijn. Het resultaat wordt vervolgens vermenigvuldigd met de eenheidsprijs van €2,00/kg. Dit levert dan de nieuwe eenheidsprijs op.

Voor de vergelijking van de twee industriehallen wordt een overspanning van 21 meter gekozen omdat dit de grenswaarde is tussen het gebruik van een vollewandligger en vakwerkligger. In figuur 52 wordt deze vergelijking weergegeven.



Figuur 52: Vergelijking industriehal met vollewandliggers en industriehal met vakwerkliggers

De gewichten van de twee industriehallen worden afgelezen uit *Diamonds*. Deze hebben de volgende waarden:

Gewicht van de vollewandliggers = 11406.4 kg

Gewicht van de vakwerkliggers = 9244.4 kg

De verhouding tussen deze hallen bedraagt dan:

$$\text{Verhouding} = \frac{\text{Gewicht vollewandliggers}}{\text{Gewicht vakwerkliggers}} = \frac{11406.4 \text{ kg}}{9244.4 \text{ kg}} = 1.234$$

Dit resultaat wordt vervolgens vermenigvuldigd met €2,00/kg en wordt de eenheidsprijs voor vakwerkstructuren verkregen.

$$\text{Eenheidsprijs vakwerkstructuur} = \text{€}2,00/\text{kg} * 1.234 = \text{€}2.468/\text{kg}$$

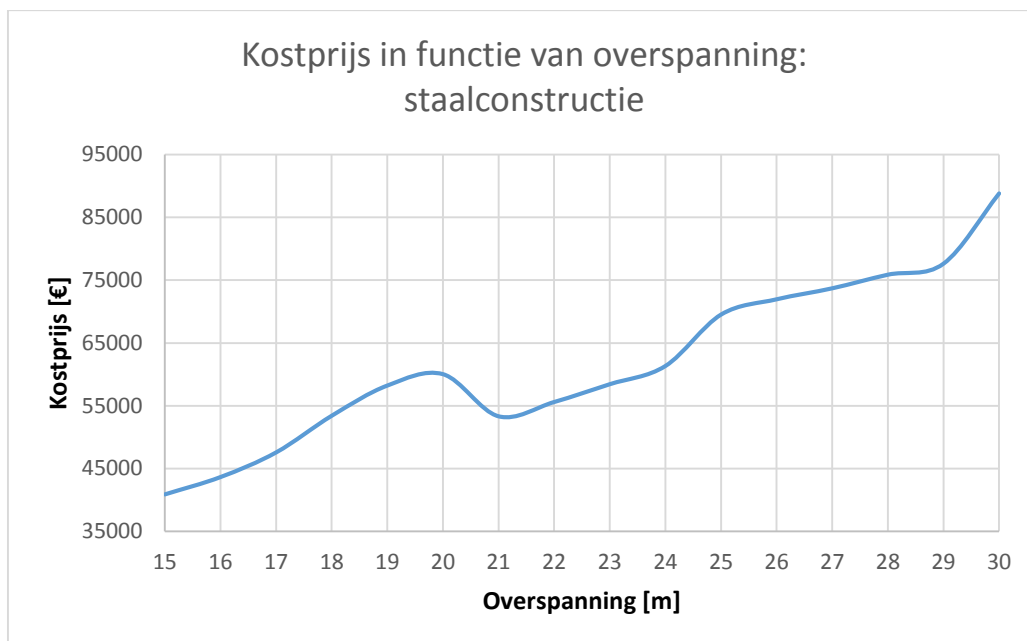
Deze prijs wordt gebruikt voor de prijsbepaling van de staalstructuur vanaf een overspanning van 21 meter.

Tabel 15 geeft de prijs van het staal en de fundering van iedere overspanning bij vakwerkstructuren.

Tabel 15: Prijsbepaling van stalen constructie bij variabele overspanning

Overspanning [m]	Totaal gewicht staal [kg]	Prijs staal [€]	Prijs fundering [€]	Totale prijs [€]
15	19749,908	39449,82	1378,55	40878,37
16	21131,054	42262,11	1378,55	43640,66
17	22995,953	45991,91	1577,22	47569,13
18	25806,869	51613,74	1794,82	53408,56
19	28213,586	56427,17	1794,82	58221,99
20	28998,593	57997,19	2031,33	60028,52
21	20008,978	49382,16	1692,10	51074,26
22	20894,978	51568,81	1692,10	53260,91
23	21908,058	54069,09	1909,70	55978,78
24	23033,8	56847,42	1909,70	58757,12
25	26053,912	64301,05	2308,40	66609,45
26	26997,992	66631,04	2308,40	68939,44
27	27677,292	68307,56	2308,40	70615,95
28	28348,902	69965,09	2743,59	72708,68
29	29029,882	71645,75	2743,59	74389,33
30	33366,068	82347,46	2743,59	85091,04

Figuur 53 toont het verloop van de kostprijs in functie van de overspanning. Opmerkelijk is de daling van de curve tussen de overspanningen van 20 en 21 meter. Deze beweging is ten gevolge van de overschakeling van een vollewandligger naar vakwerklijger.



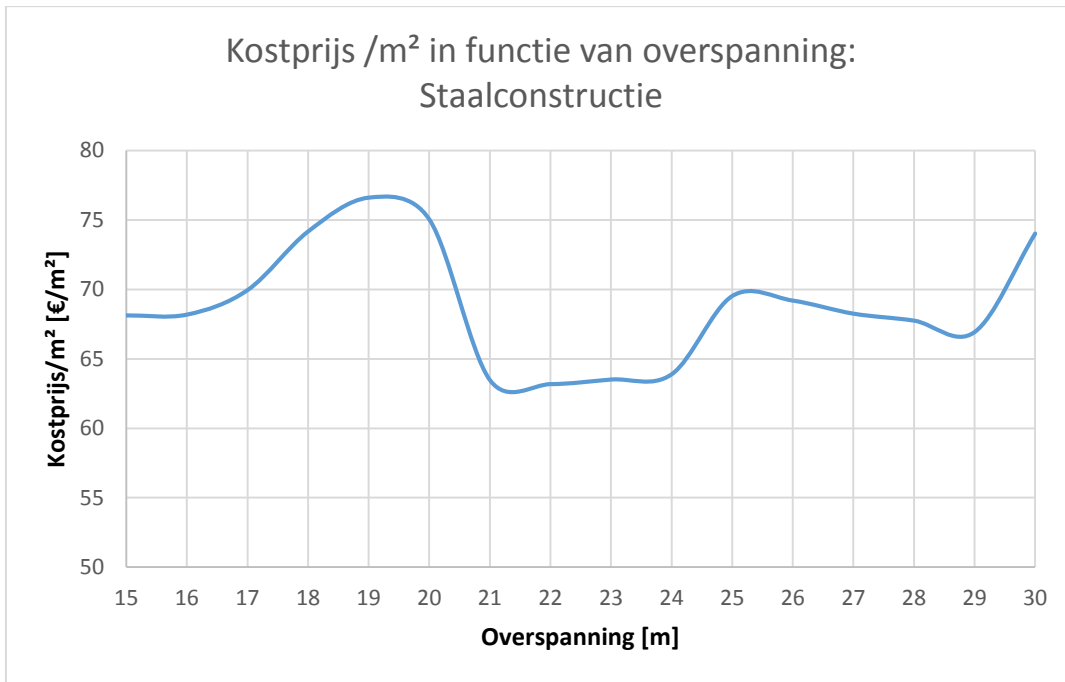
Figuur 53: Prijs in functie van overspanning bij staalstructuur

Om inzicht te krijgen in hoeveel een industriehal kost per vierkante meter is tabel 16 opgesteld. De kostprijs per vierkante meter bij variabele overspanningen is weergegeven in figuur 54.

Tabel 16: Kostprijs per vierkante meter van staalconstructie bij variabele overspanning

Overspanning [m]	Oppervlakte [m ²]	Totale kostprijs [€]	Kostprijs/m ² [€/m ²]
15	600	40878,37	68,13
16	640	43640,66	68,19
17	680	47569,13	69,95
18	720	53408,56	74,18
19	760	58221,99	76,61
20	800	60028,52	75,04
21	840	51074,26	60,80
22	880	53260,91	60,52
23	920	55978,78	60,85
24	960	58757,12	61,21
25	1000	66609,45	66,61
26	1040	68939,44	66,29
27	1080	70615,95	65,39
28	1120	72708,68	64,92
29	1160	74389,33	64,13
30	1200	85091,04	70,91

Deze grafiek geeft de prijs per vierkante meter weer in functie van de overspanning. Ter hoogte van een overspanning van 21 meter treedt er een aanzienlijke prijsdaling op. Deze daling is te danken aan de overschakeling van vollewandligger naar vakwerkligger.



Figuur 54: Prijs per vierkante meter bij staalstructuur

4.3 Betonstructuur met houten gelamelleerde liggers

4.3.1 Ontwerp

De houten gelamelleerde liggers bij een variabele overspanning zijn berekend aan de hand van de vuistregels zoals weergegeven in figuur 26 (zie 3.5.1). Doordat de overspanning varieert, zal de hoogte van de profielen wijzigen. De dikte van de liggers is niet constant voor de verschillende overspanningen. Bij een overspanning van 15 meter voldoet een breedte van 160 mm. Voor de overige overspanningen bedraagt deze dikte 180 mm tot 200 mm. De afmetingen van de betonnen kolommen variëren van een breedte van 250mm voor een overspanning van 15 meter tot een breedte van 450mm voor een overspanning van 30 meter. De afmetingen van deze elementen zijn weergegeven in tabel 17.

Tabel 17: Afmetingen van gelamelleerde houten liggers bij variabele overspanning

Overspanning [m]	Breedte [mm]	Hoogte zijkant [mm]	Hoogte midden [mm]	Betonnen kolom [mm]
15	160	500	937,5	250/250
16	180	533,3	1000	250/250
17	180	566,7	1062,5	250/250
18	180	600	1125	300/300
19	180	633,3	1187,5	300/300
20	180	666,7	1250	300/300
21	180	700	1312,5	350/350
22	180	733,3	1375	350/350
23	180	766,7	1437,5	400/400
24	180	800	1500	400/400
25	180	833,3	1562,5	400/400
26	180	866,7	1625	400/400
27	180	900	1687,5	400/400
28	180	933,3	1750	400/400
29	200	966,7	1812,5	450/450
30	200	1000	1875	450/450

De hoeveelheid staal is afhankelijk van de windverbanden en drukkokers in de structuur. Het totale gewicht van de drukkokers blijft grotendeels constant aangezien deze profielen niet verzwaard moeten worden bij een grotere overspanning. De lengte van deze drukkokers zal ook hetzelfde blijven. Bij de windverbanden is dit echter niet zo. De lengte van de windverbanden in het dak en in de kopgevel is afhankelijk van de onderlinge tussenafstand van de drukkokers. Net zoals de vakwerken bij een staalconstructie, wordt er bij windverbanden gestreefd naar een optimale hoek van 45°.

4.3.2 Prijsbepaling

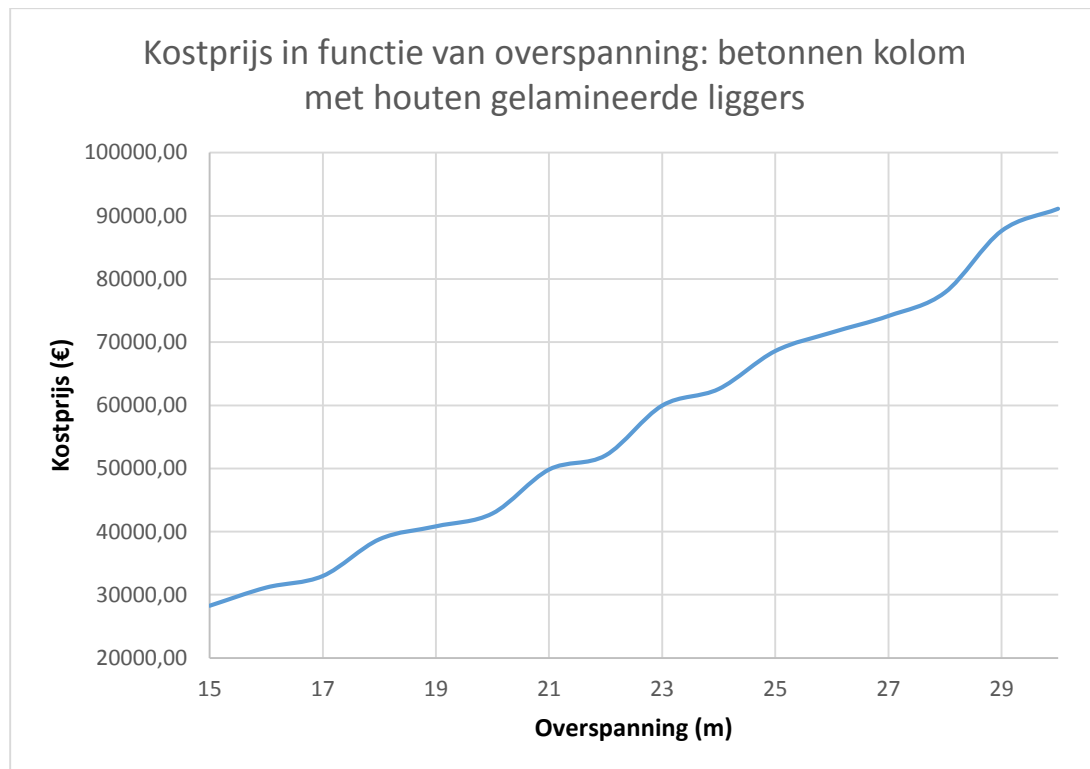
Tabel 18 geeft een overzicht van de prijsberekening van de industriehal met variabele afmetingen. De kostprijs van de houten gelamelleerde liggers is de meest bepalende factor van de totale kostprijs. Deze bedraagt gemiddeld 45% van de totale kostprijs. De prijs van het beton is de som van de afzonderlijke prijzen van de fundering en de

kolommen. Dit is hetzelfde bij de prijs van de wapening. De berekeningen van het volume van de houten liggers en de windverbanden voor iedere overspanning zijn terug te vinden in bijlage 4. Eveneens zijn de volumes van de wapening en beton in fundering en kolommen toegevoegd in deze bijlage.

Tabel 18: Prijsbepaling betonstructuur met houten gelamelleerde liggers bij variabele overspanning

Overspanning [m]	Prijs staal [€]	Prijs hout [€]	Prijs beton [€]	Prijs fund. [€]	Prijs wapening [€]	Totale prijs [€]
15	7788,20	9959,01	6443,62	1493,43	2589,30	28273,56
16	7877,35	12747,25	6443,62	1493,43	2589,30	31150,96
17	7970,04	14391,06	6443,62	1590,40	2589,30	32984,43
18	8066,03	16133,59	9278,82	1590,40	3728,59	38797,43
19	8165,09	17975,68	9278,82	1692,10	3728,59	40840,28
20	8266,99	19918,36	9278,82	1692,10	3728,59	42884,87
21	8371,56	21959,61	12629,50	1798,54	5075,03	49834,23
22	8478,59	24100,42	12629,50	1798,54	5075,03	52082,07
23	8587,91	26341,97	16495,67	1909,70	6628,61	59963,87
24	8699,37	28681,94	16495,67	2088,10	6628,61	62593,70
25	8812,82	34579,41	16495,67	2088,10	6628,61	68604,61
26	8928,12	37402,11	16495,67	2088,10	6628,61	71542,61
27	9045,15	39771,88	16495,67	2208,72	6628,61	74150,03
28	9163,78	43376,47	16495,67	2208,72	6628,61	77873,25
29	9283,91	46531,26	20877,34	2530,05	8389,33	87611,87
30	9405,43	49795,04	20877,34	2664,86	8389,33	91132,00

Figuur 55 geeft een grafische voorstelling weer van de kostprijs in functie van de overspanning. Het verloop van deze voorstelling is lineair zoals verwacht. Er treden echter wel schommelingen op. Deze zijn een gevolg van een wijziging van de afmetingen van één of meerdere elementen. Bijvoorbeeld bij de overschakeling van een overspanning van 28 meter naar 29 meter neemt de curve aanzienlijker toe dan bij de vorige overspanningen. De oorzaak hiervan is dat vanaf deze overspanning de betonnen kolommen een grotere doorsnede vereisen, waardoor de kostprijs van beton en wapening toeneemt.



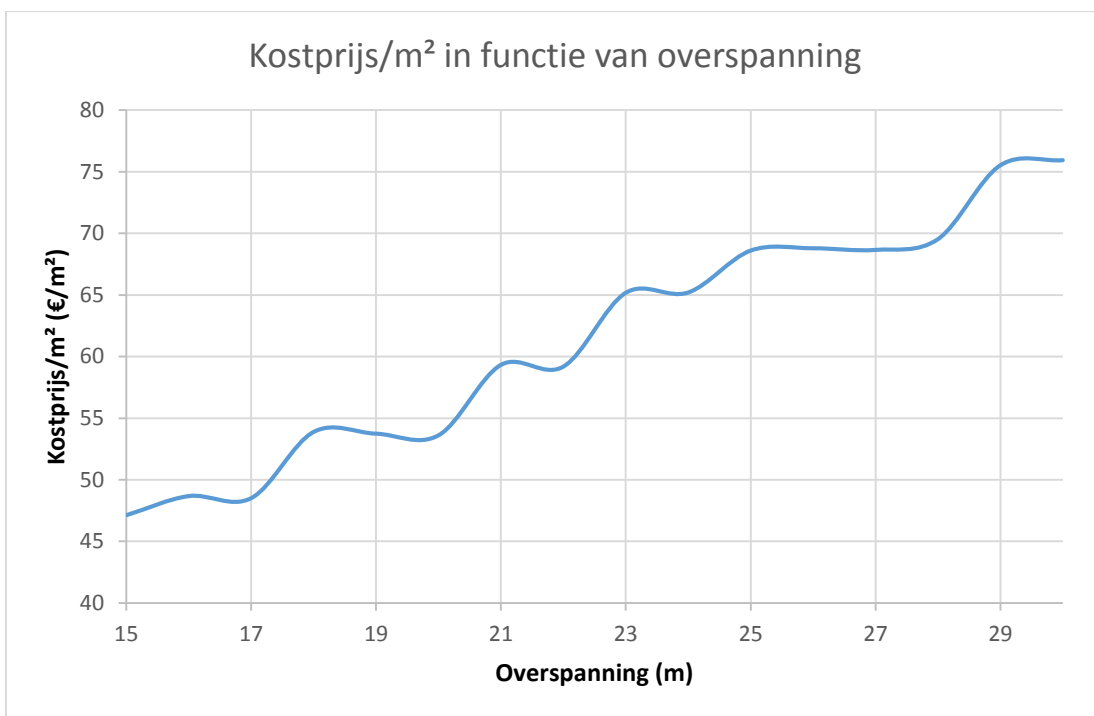
Figuur 55: Prijs in functie van overspanning bij betonstructuur met houten gelamineerde liggers

Tabel 19 geeft de kostprijs per vierkante meter bij variabele overspanningen weer. Uit deze tabel kan er worden afgeleid dat de kostprijs per vierkante meter toeneemt naarmate de overspanning groter wordt.

Tabel 19: Kostprijs per vierkante meter van betonstructuur met houten gelamineerde liggers bij variabele overspanning

Overspanning [m]	Oppervlakte [m²]	Totale prijs [€]	Prijs/m² [€/m²]
15	600	28273,56	47,1226
16	640	31150,96	48,67337
17	680	32984,43	48,50651
18	720	38797,43	53,88532
19	760	40840,28	53,73721
20	800	42884,87	53,60608
21	840	49834,23	59,32647
22	880	52082,07	59,18417
23	920	59963,87	65,17811
24	960	62593,70	65,20177
25	1000	68604,61	68,60461
26	1040	71542,61	68,79097
27	1080	74150,03	68,65744
28	1120	77873,25	69,52969
29	1160	87611,87	75,52748
30	1200	91132,00	75,94333

Deze tabel wordt grafisch voorgesteld in de volgende figuur 56. Bij lagere overspanningen bedraagt de kostprijs per vierkante meter 45-55 €/m². Bij de overschakeling van vollwandliggers naar vakwerkliggers neemt deze prijs toe en bevindt zich tussen de 60 en 75 €/m². Opmerkelijk is het nagenoeg constante verloop van de curve bij de overspanningen van 25 tot 28 meter. De reden hiervoor is dat de meeste stalen profielen ongewijzigd blijven bij deze overspanningen, waardoor de kostprijs per vierkante meter nauwelijks wijzigt.



Figuur 56: Prijs/m² in functie van overspanning bij betonstructuur met houten gelamelleerde liggers

4.4 Geprefabriceerde betonstructuur

4.4.1 Ontwerp

In de stalen en beton-houtconstructie variëren de overspanningen van 15 tot 30 meter en wordt de kostprijs per meter uitgerekend. Bij de geprefabriceerde betonconstructie varieert de overspanning van 14 tot 30 meter en wordt de kostprijs per twee meter uitgerekend, uitgezonderd de overspanning van 16 meter. Ten gevolge van de variabele overspanningen zullen de hoogte van de IV-liggers, de hoogte van de kopliggers en de doorsnede van de betonnen kolommen wijzigen. De hoogte in het midden van de IV-liggers varieert van 900mm voor een overspanning van 14 meter tot een hoogte in het midden van 1200mm voor een overspanning van 30 meter. De breedte van de IV-liggers en kopliggers blijft constant over de variabele overspanningen. De hoogte van kopliggers wijzigt wel en varieert van 300mm tot 500mm. De afmetingen van de betonnen kolommen wijzigen ook ten gevolge van de hogere belasting en variëren van een breedte van 250mm tot 450mm. De afmetingen van deze elementen zijn weergegeven in tabel 20.

Tabel 20: Afmetingen elementen van geprefabriceerde betonconstructie bij variabele overspanningen

Over-spanning [m]	IV-type	Breedte [mm]	Hoogte zijkant [mm]	Hoogte midden [mm]	Kop-ligger [mm]	Betonnen kolom [mm]	Gording [B1,B2,H]
14	40/90 - 5%	400	865	900	200x300	250x250	180, 220, 290
18	40/100 - 5%	400	955	1000	200x300	250x250	180, 220, 290
20	40/100 - 5%	400	950	1000	200x350	300x300	180, 220, 290
22	40/100 - 5%	400	945	1000	200x400	300x300	180, 220, 290
24	40/110 - 5%	400	1040	1100	200x400	350x350	180, 220, 290
26	40/110 - 5%	400	1035	1100	200x450	350x350	180, 220, 290
28	40/120 - 5%	400	1130	1200	200x500	400x400	180, 220, 290
30	40/120 - 5%	400	1125	1200	200x500	400x400	180, 220, 290

De hoeveelheid staal is enkel afhankelijk van de windverbanden in de structuur. De lengte van de windverbanden in het dak en in de kopgevel is afhankelijk van de onderlinge tussenafstand van de dakgordingen. Doordat deze tussenafstand wijzigt ten gevolge van de variabele overspanningen, wijzigt evenzeer de lengte van de windverbanden en dus ook de hoeveelheid staal.

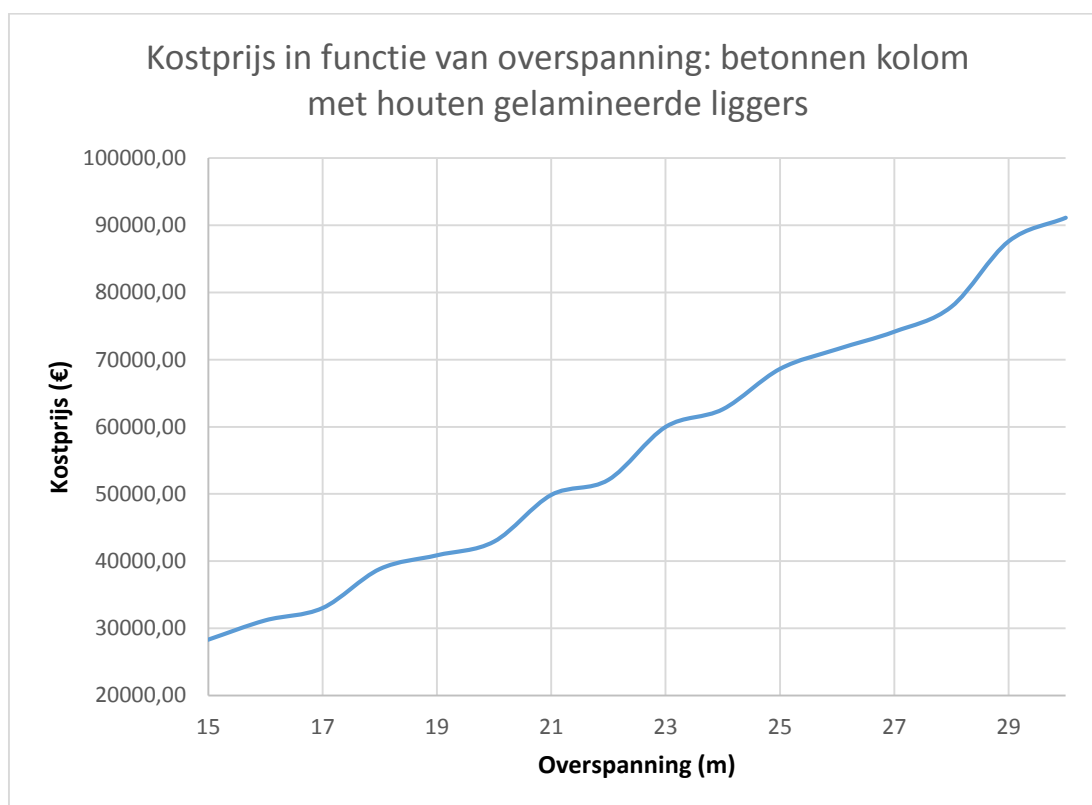
4.4.2 Prijsbepaling

Tabel 21 geeft een overzicht van de prijsberekening van de industriehal met variabele afmetingen. De kostprijs van de voorgespannen betonnen liggers is de meest bepalende factor van de totale kostprijs. Deze bedraagt gemiddeld 35% van de totale kostprijs. De overige gewichten en volumes van de elementen zijn weergegeven in bijlage 5.

Tabel 21: Prijsbepaling geprefabriceerde betonstructuur bij variabele overspanningen

Overspanning [m]	Prijs staal [€]	Prijs IV ligger [€]	Prijs betonnen kolom [€]	Prijs betonnen balk [€]	Prijs fund. [€]	Prijs wapening [€]	Totale prijs [€]
14	4478,47	14297,50	6443,62	8155,54	1909,70	6409,96	41694,79
18	4841,66	17692,50	6443,62	8450,32	2146,21	6548,05	46122,36
20	5042,62	18963,00	9278,82	8843,36	2271,57	7871,47	52270,83
22	5254,21	21192,50	9278,82	9285,52	2464,16	8078,62	55553,83
24	5475,00	22575,00	12629,50	9482,04	2664,86	9517,12	62343,52
26	5703,75	23551,50	12629,50	9997,91	2804,40	9758,78	64445,84
28	5939,40	25284,00	16495,67	10562,90	3017,94	11577,05	72876,96
30	6181,06	27090,00	16495,67	10808,55	3239,59	11692,13	75507,00

Figuur 57 geeft een grafische voorstelling weer van de kostprijs in functie van de overspanning. Het verloop van deze voorstelling is lineair zoals verwacht. Er treden echter wel schommelingen op. Deze zijn een gevolg van een wijziging van de afmetingen van één of meerdere elementen. Bijvoorbeeld bij de overschakeling van een overspanning van 28 meter naar 29 meter neemt de curve aanzienlijk toe dan bij de vorige overspanningen. De oorzaak hiervan is dat vanaf deze overspanning de betonnen kolommen een grotere doorsnede vereisen, waardoor de kostprijs van beton en wapening toeneemt.



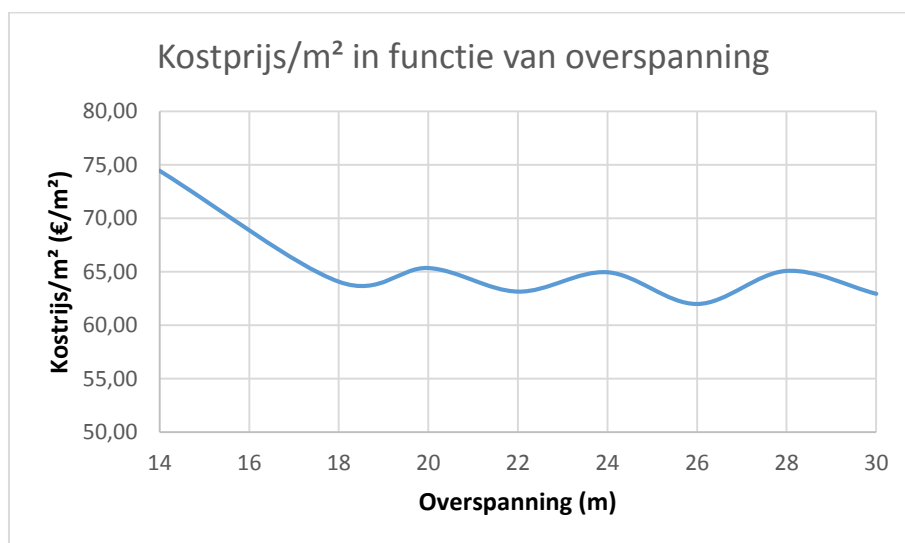
Figuur 57: Kostprijs in functie van overspanning bij betonstructuur met houten gelamineerde liggers

Tabel 22 geeft de kostprijs per vierkante meter bij variabele overspanningen weer. Uit deze tabel kan er worden afgeleid dat de kostprijs per vierkante meter daalt naarmate de overspanning groter wordt.

Tabel 22: Kostprijs per vierkante meter van geprefabriceerde betonstructuur bij variabele overspanning

Overspanning [m]	Oppervlakte [m ²]	Totale prijs [€]	Prijs/m ² [€/m ²]
14	560	41694,79	74,45
18	720	46122,36	64,06
20	800	52270,83	65,34
22	880	55553,83	63,13
24	960	62343,52	64,94
26	1040	64445,84	61,97
28	1120	72876,96	65,07
30	1200	75507,00	62,92

Deze tabel is grafisch voorgesteld in de onderstaande 58. Deze grafiek kan onderverdeeld worden in twee zones. De eerste zone bevindt zich tussen de overspanning 14 en 18 meter en de tweede zone tussen 18 en 30 meter. De eerste zone vertoont een sterke daling van de kostprijs per vierkante meter. De verklaring hiervoor is dat de toename van de onderlinge prijzen ten gevolge van de stijging van de overspanning kleiner is dan de toename van de oppervlakte. De onderlinge prijzen nemen toe met ongeveer 10,6%, terwijl de oppervlakte toeneemt met 35%. Met andere woorden, voorgespannen betonnen liggers zijn financieel nadeliger bij kleinere overspanningen dan bij grotere overspanningen. Vandaar dat er een sterke daling van de kostprijs per vierkante meter optreedt tussen de overspanningen 14 en 18 meter. In de tweede zone wordt er globaal een zeer lichte daling waargenomen, terwijl er lokaal schommelingen optreden. De schommelingen zijn enerzijds te verklaren door de toename van de afmetingen van één of meerdere elementen, waardoor de kostprijs per vierkante meter toeneemt. Anderzijds door wat er in de eerste zone is opgetreden, waardoor de kostprijs per vierkante meter daalt. Maar globaal bekeken, neemt de kostprijs per vierkante meter af naarmate de overspanning toeneemt.



Figuur 58: Prijs/m² in functie van overspanning bij geprefabriceerde betonstructuur

4.5 Prijsvergelijking

In tabel 23 is de prijsvergelijking tussen de verschillende industriehallen weergegeven. Voor de staalstructuur en de betonstructuur met houten gelamelleerde liggers is de kostprijs berekend voor de overspanningen van 15 meter tot en met 30 meter. De prijzen van de geprefabriceerde betonstructuur zijn niet voor iedere meter gegeven aangezien de prijs niet voor iedere overspanning beschikbaar was.

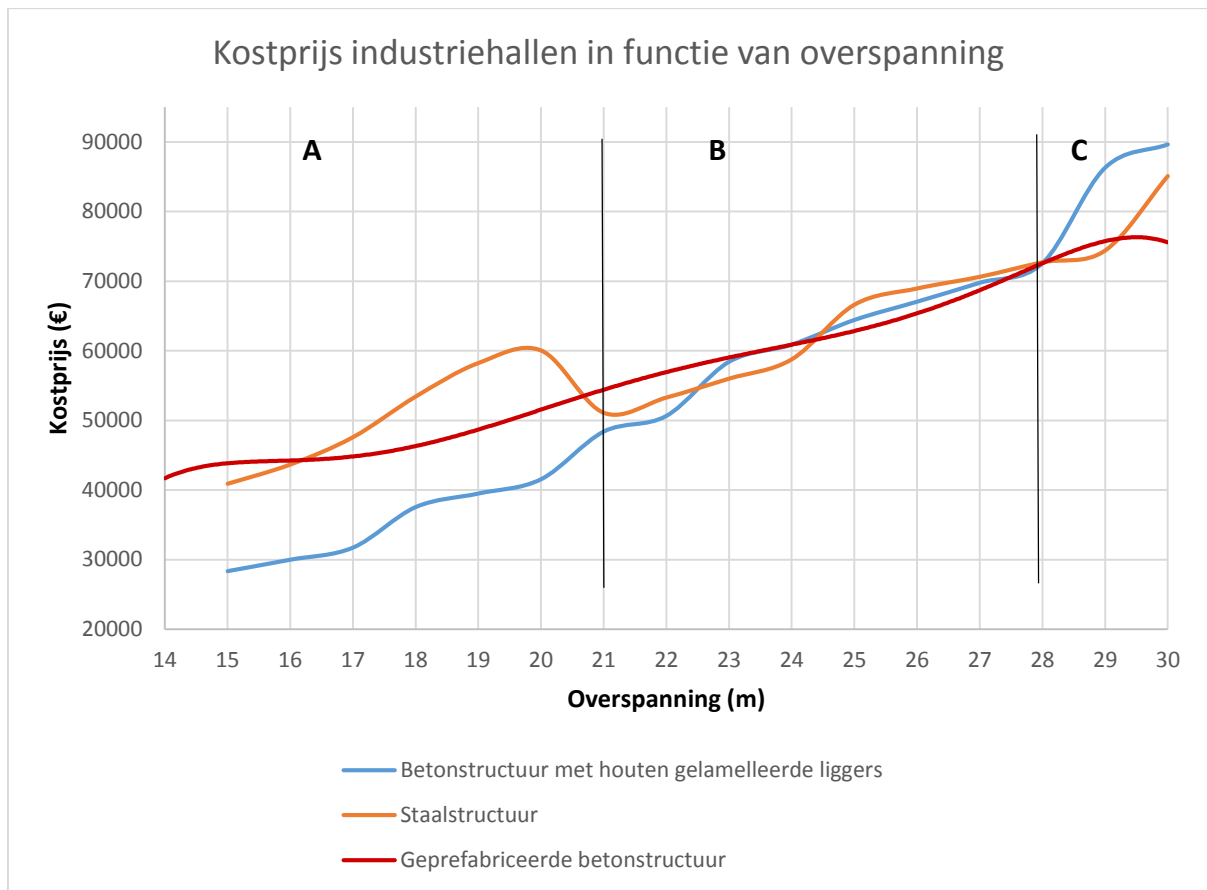
Tabel 23: Prijsvergelijking tussen de verschillende industriehallen

Overspanning [m]	Kostprijs staal [€]	Kostprijs beton-hout [€]	Kostprijs geprefabriceerd beton [€]
14	/	/	41694,79
15	40878,37	28326,39	/
16	43640,66	29966,35	/
17	47569,13	31709,71	/
18	53408,56	37530,69	46122,36
19	58221,99	39480,10	/
20	60028,52	41532,18	52270,83
21	51074,26	48383,82	/
22	53260,91	50640,58	55553,83
23	55978,78	58419,17	/
24	58757,12	60879,89	62343,52
25	66609,45	64431,42	/
26	68939,44	67052,66	64445,84
27	70615,95	69772,17	/
28	72708,68	72592,96	72876,96
29	74389,33	86310,25	/
30	85091,04	89659,97	75507,00

De waarden in voorgaande tabel zijn grafisch voorgesteld in figuur 59. Deze grafiek kan onderverdeeld worden in drie zones:

- zone A: 14 meter – 21 meter,
- zone B: 21 meter – 28 meter,
- zone C: 28 meter – 30 meter.

In zone A is de betonnen structuur met houten gelamelleerde liggers financieel het meest voordelig. Zone B wordt de schemerzone genoemd aangezien elke type van industriehal bij een bepaalde overspanning financieel even voordelig is. In zone C is het de geprefabriceerde betonstructuur dat de voorkeur geniet.



Figuur 59: Prijsvergelijking tussen de verschillende industriehallen

4.5.1 Zone A

Zone A omvat de overspanningen van 14 tot 21 meter. Bij de kleinste overspanningen 14 tot en met 16 meter is de geprefabriceerde betonstructuur financieel het meest nadelig. De verklaring hiervoor is dat voorgespannen liggers financieel voordeliger zijn bij grotere overspanningen dan bij kleinere overspanningen. Deze redenering wordt grafisch verklaard door middel van figuur 60, waarin de kostprijs per vierkante meter in functie van de overspanning is voorgesteld. Bij de overige overspanningen kan er vastgesteld worden dat de staalstructuur financieel het meest nadelig is. In tabel 24 zijn de aanpassingen van de constructie weergegeven die nodig zijn wanneer de overspanning van 16 naar 20 meter wordt verhoogd. Eveneens is het prijsverschil tussen de kostprijzen van de overspanning van 16 meter en 20 meter weergegeven. Uit deze tabel kan worden afgeleid dat de aanpassingen van de staalstructuur een groter prijsverschil veroorzaken dan de betonstructuur met houten gelamelleerde liggers en geprefabriceerde betonstructuur. Vandaar dat de staalstructuur financieel het meest nadelig is voor deze overspanningen.

Tabel 24: Aanpassingen constructie bij verhoging van de overspanning van 16 naar 20 meter

Type industriehal	Aanpassing ligger	Aanpassing kolom	Prijsverschil [€]
Betonstructuur met houten gelamelleerde liggers	Hoogte midden (mm): 1000 → 1250	Doorsnede (mm): 250/250 → 300/300	11565,83
Staalstructuur	Profiel: IPE360 → IPE450	Profiel: IPE360 → IPE450	16387,86
Geprefabriceerde betonstructuur (*)	Hoogte zijkant (mm): 955 → 950 Doorsnede kopligger: 200/300 → 200/350	Doorsnede (mm): 250/250 → 300/300	6148,47
(*) Aanpassingen van de constructie bij verhoging van de overspanning van 18 naar 20 meter			

Het prijsverschil van de geprefabriceerde betonstructuur is klein ten opzichte van de andere structuren. Dit komt doordat de aanpassingen van deze structuur betrekking hebben bij de verhoging van de overspanning van 18 naar 20 meter. Terwijl de aanpassingen van de andere structuren betrekking hebben bij de verhoging van de overspanning van 16 naar 20 meter. Over de gehele zone A is de betonstructuur met houten gelamelleerde liggers financieel het voordeligste. Bij de overgang van zone A naar zone B, daalt de kostprijs van de staalstructuur aanzienlijk. Dit is ten gevolgen van de overschakeling van vollwandliggers naar vakwerkliggers.

4.5.2 Zone B

Zone B, eveneens de schemerzone genoemd, omvat de overspanningen van 21 tot 28 meter. In deze zone liggen de kostprijzen van de drie typen industriehallen zeer dicht bij elkaar. In het begin van zone B blijft de betonstructuur met houten gelamelleerde liggers financieel het voordeligste. Voor de overspanningen 23 en 24 meter is de staalstructuur financieel het voordeligste. De redenen hiervoor zijn: ten eerste de omschakeling naar een vakwerkstructuur en ten tweede zijn er geen aanpassingen vereist bij de verhoging van de overspanning van 22 naar 23 meter. Bij de andere structuren zijn er wel aanpassingen vereist, opdat de structuur voldoet. Op het moment dat de overspanning van 24 meter wordt bereikt, zal de geprefabriceerde betonstructuur financieel het voordeligste worden. Dit is te wijten aan de nodige aanpassingen van de andere structuren. De geprefabriceerde betonstructuur echter, vereist tot en met een overspanning van 27 meter geen aanzienlijke aanpassingen om aan de optredende belastingen te weerstaan. Opmerkelijk is de overgang van zone B naar zone C. In figuur 59 is duidelijk waar te nemen dat de kostprijs van elk type industriehal nagenoeg gelijk is aan elkaar. Uit de tabel 23 kan dezelfde vaststelling gemaakt worden. Het verschil in kostprijs tussen de industriehallen bedraagt minimaal 115 euro en maximaal 284 euro. Dit verschil is relatief klein ten opzichte van de totale kostprijs.

4.5.3 Zone C

Zone C omvat de overspanningen van 28 tot 30 meter. Opmerkelijk in deze zone is de abrupte stijging van de kostprijs van de betonstructuur met houten gelamelleerde liggers bij een overspanning van 28 meter. Eveneens is er een abrupte stijging van de kostprijs van de staalstructuur bij een overspanning van 29 meter. Het verloop van de geprefabriceerde betonstructuur blijft zich echter lineair voortzetten, waardoor de

toename van de kostprijs klein is ten opzichte van de andere structuren. In tabel 25 wordt de vereiste aanpassingen bij een verhoging van de overspanning van 28 naar 30 meter weergegeven. Hieruit kan vastgesteld worden dat de betonstructuur met houten gelamelleerde liggers het grootste prijsverschil vertoont en de geprefabriceerde betonstructuur het laagste prijsverschil. De verklaring van dit prijsverschil kan eveneens aangetoond worden met behulp van dezelfde tabel. Voor de betonstructuur met houten gelamelleerde liggers is er een verhoging van de ligger en verhoging van de doorsnede van de betonnen kolommen vereist, opdat het voldoet aan de optredende belastingen. Voor de staalstructuur zijn er ook enkele aanpassingen vereist, maar deze hebben een aanzienlijk kleinere impact op de kostprijs dan bij de betonstructuur met houten gelamelleerde liggers. Voor de geprefabriceerde betonstructuur zijn er geen aanpassingen vereist, waardoor de toename van de kostprijs zeer laag is.

Tabel 25: Aanpassingen constructie bij verhoging van de overspanning van 28 naar 30 meter

Type industriehal	Aanpassing ligger	Aanpassing kolom	Prijsverschil [€]
Betonstructuur met houten gelamelleerde liggers	Hoogte midden (mm): 1750 → 1875	Doorsnede (mm): 400/400 → 450/450	17067,00
Staalstructuur	Profiel: HEB220 → HEB240 Profiel: SHS 150x150x8 → SHS 150x150x10	/	12382,40
Geprefabriceerde betonstructuur	/	/	2630,04

Uit deze prijsvergelijking kan er worden afgeleid dat elke aanpassing van de structuur een zekere invloed heeft op de kostprijs van de verschillende industriehallen. Vandaar dat elk type industriehal bij een bepaalde overspanning financieel het voordeligste is. Er is dus geen eenduidig antwoord op de vraag "welk type industriehal is financieel het voordeligste", wegens de grote afhankelijkheid van de overspanning.

4.5.4 Kostprijs per vierkante meter

Er kan ook een prijsvergelijking uitgevoerd worden op basis van de kostprijs per vierkante meter tussen de verschillende industriehallen. Deze prijzen zijn weergegeven in tabel 26.

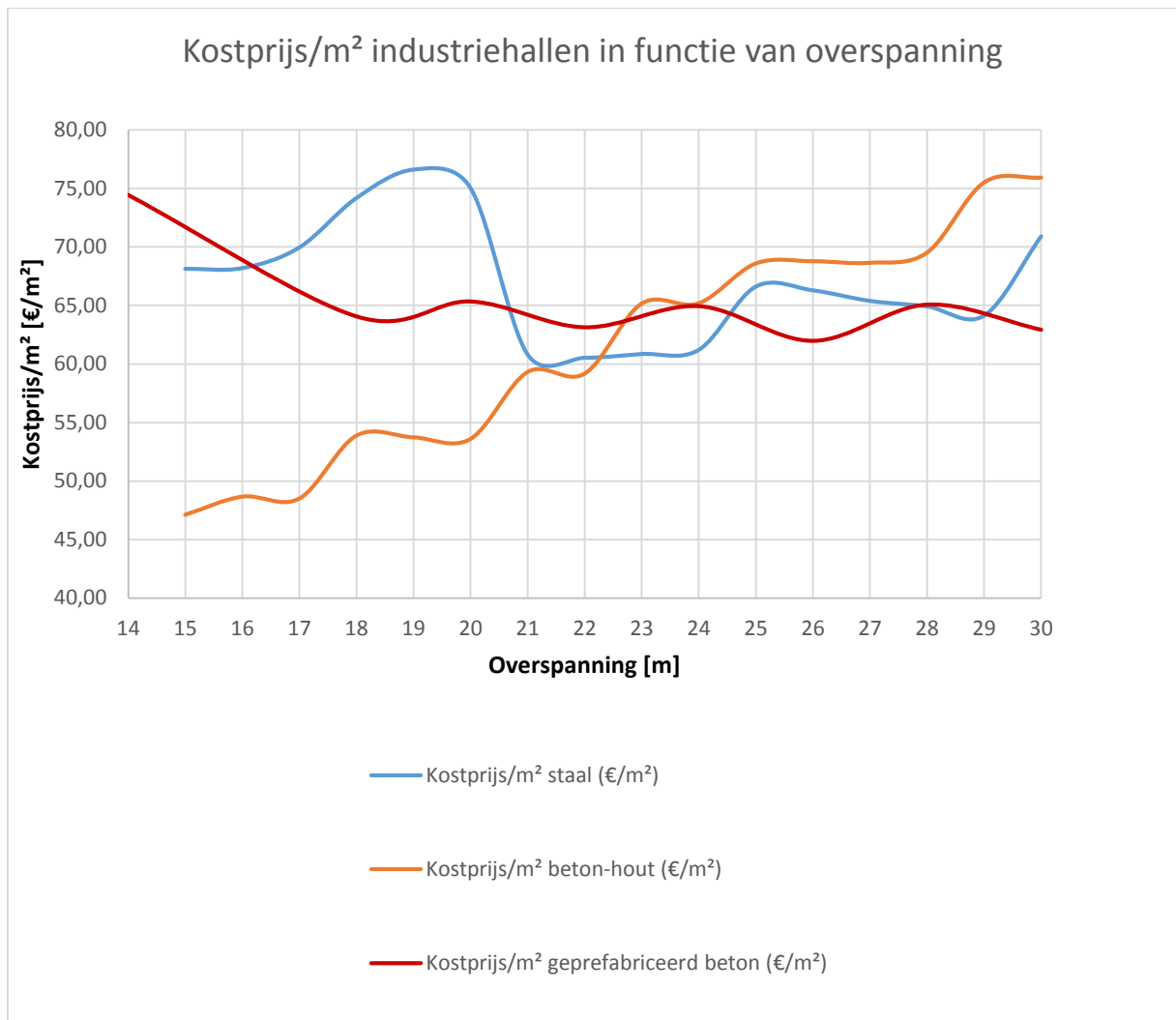
Tabel 26: Vergelijking kostprijs per vierkante meter tussen de verschillende industriehallen

Overspanning [m]	Kostprijs/m ² staal [€/m ²]	Kostprijs/m ² beton-hout [€/m ²]	Kostprijs/m ² geprefabriceerd beton [€/m ²]
14	/	/	74,45
15	68,13	47,12	/
16	68,19	48,67	/
17	69,95	48,51	/
18	74,18	53,89	64,06
19	76,61	53,74	/
20	75,04	53,61	65,34
21	60,80	59,33	/
22	60,52	59,18	63,13
23	60,85	65,18	/
24	61,20	65,20	64,94
25	66,61	68,60	/
26	66,29	68,79	61,97
27	65,39	68,66	/
28	64,92	69,53	65,07
29	64,13	75,53	/
30	70,91	75,94	62,92

Deze prijzen zijn vervolgens grafisch voorgesteld in onderstaande figuur 60. Uit de grafische voorstelling kunnen drie vaststellingen afgeleid worden.

De eerste vaststelling heeft betrekking tot de betonstructuur met houten gelamelleerde liggers. Er is duidelijk waar te nemen dat de kostprijs per vierkante meter toeneemt met de overspanning. Dit te verklaren doordat de hoogte en breedte van de houten gelamelleerde liggers en de doorsnede van de betonnen kolommen toeneemt bij hogere overspanningen. Met andere woorden, de toename van de hoeveelheid materiaal (beton en hout) is groter dan de toename van de oppervlakte ten gevolge van grotere overspanning.

De tweede vaststelling heeft betrekking tot de staalstructuur. De grafiek horende bij deze structuur kan onderverdeeld worden in twee zones. De eerste zone vertegenwoordigt de staalstructuur met vollwandliggers, terwijl de tweede zone de staalstructuur met vakwerkliggers voorstelt. In de eerste zone neemt de kostprijs per vierkante meter toe met de overspanning, wegens de toename van de hoeveelheid staal. Opmerkelijk is de aanzienlijke daling van de kostprijs per vierkante meter wanneer er overgeschakeld wordt van vollwandliggers naar vakwerkliggers. Bij hogere overspanningen neemt de kostprijs per vierkante meter bij de staalstructuur met vakwerkliggers eveneens toe.



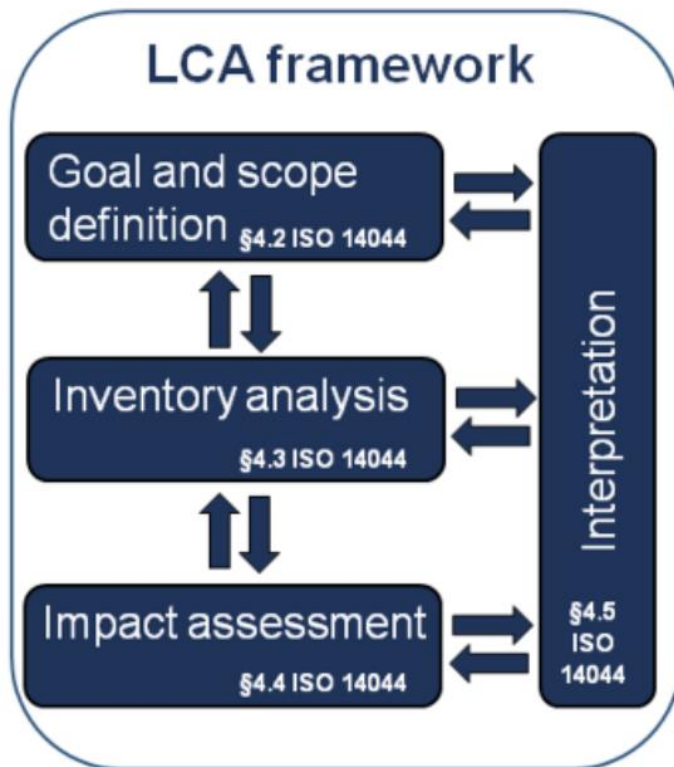
Figuur 60: Vergelijking kostprijs per vierkante meter tussen verschillende industriehallen

De derde vaststelling heeft betrekking tot de geprefabriceerde betonstructuur. De grafiek van deze structuur vertoont een afname van de kostprijs per vierkante meter. Opmerkelijk aan deze voorstelling is de sterke daling bij de kleinere overspanningen. Dit kan verklaard worden door het feit dat voorgespannen betonnen liggers financieel voordeliger zijn bij hogere overspanningen. Vandaar dat bij de hogere overspanningen de daling trager verloopt. Bij kleinere overspanningen is de hoeveelheid beton in de liggers relatief hoger dan bij grotere overspanningen. Dat is ook de reden waarom voorgespannen betonnen liggers voornamelijk toegepast worden bij de grotere overspanningen en gewapend betonnen liggers bij kleinere overspanningen.

5 Levenscyclusanalyse

De levenscyclusanalyse (LCA) van de verschillende industriehallen wordt bepaald met behulp van het softwarepakket van GaBi. Deze LCA bestaat uit vier belangrijke stappen: [7]

- Definitie van doel en reikwijdte,
- Analyse van de levenscyclusinventaris,
- Berekening van de impact over de hele levenscyclus,
- Interpretatie van impact van de levenscyclus.



Figuur 61: LCA Framework [19]

Iedere stap wordt in de volgende paragrafen weergegeven.

5.1 Definitie van doel en reikwijdte

In de doelstellingen wordt het doel en omvang van het onderzoek opgesteld. Het doel van deze levenscyclusanalyse is de vergelijking van de levenscyclus van de drie verschillende soorten industriehallen. Er zal voornamelijk naar de impact op de globale opwarming van de aarde gekeken worden. Het resultaat zal uitgedrukt worden in kg CO₂ equivalent dat uitgestoten wordt doorheen de levenscyclus van de industriehal.

De volledige levenscyclus van een product wordt ook wel *cradle to grave* genoemd. Dit houdt de productiefase, gebruiksfase en einde-levensfase in. In deze masterproef wordt er enkel rekening gehouden met *cradle to gate* oftewel van wieg tot fabriekspoort. Dit wordt gedaan omdat de gebruiksfase en eindelevensfase geen bijdrage hebben aan dit onderzoek.

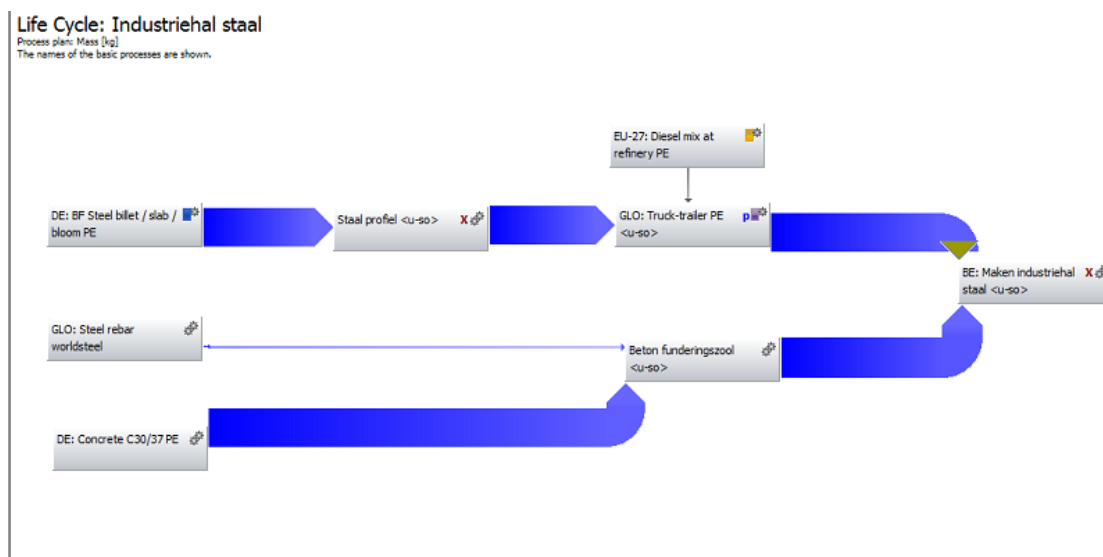
5.2 Analyse van de levenscyclusinventaris

Een project in GaBi werkt met *plans*, *processes* en *flows*. Een plan is het algemene document waarin gewerkt kan worden. Dit plan bevat de processen, *flows* en de grenzen van het systeem. Processen zijn de verschillende materialen en materiaalbewerkingen die uitgevoerd worden om een product te bekomen. Deze processen worden met elkaar verbonden door middel van *flows*. De *flows* geven dus aan hoeveel materiaal of energie er van het ene proces naar het andere proces gaan.

Ieder proces heeft *inputs* en *outputs*. De *inputs* geven aan hoeveel eenheden van een materiaal het proces binnenkomen. Anderzijds geven de *outputs* de hoeveelheden aan die het proces verlaten. Een voorbeeld van een proces is het maken van een funderingszool. De *inputs* zijn het materiaal beton en de wapeningsstaven. De *output* is één funderingszool. Indien er voor een proces energie nodig is om het te realiseren is er nog een externe *input* genaamd 'energy'. Deze kan bestaan uit verschillende vormen van energie zoals elektriciteit, natuurlijke energie of nucleaire energie. In de inventaris analyse wordt ieder proces en *flow* ingegeven samen met de bijhorende eenheden.

5.2.1 Industriehal staal

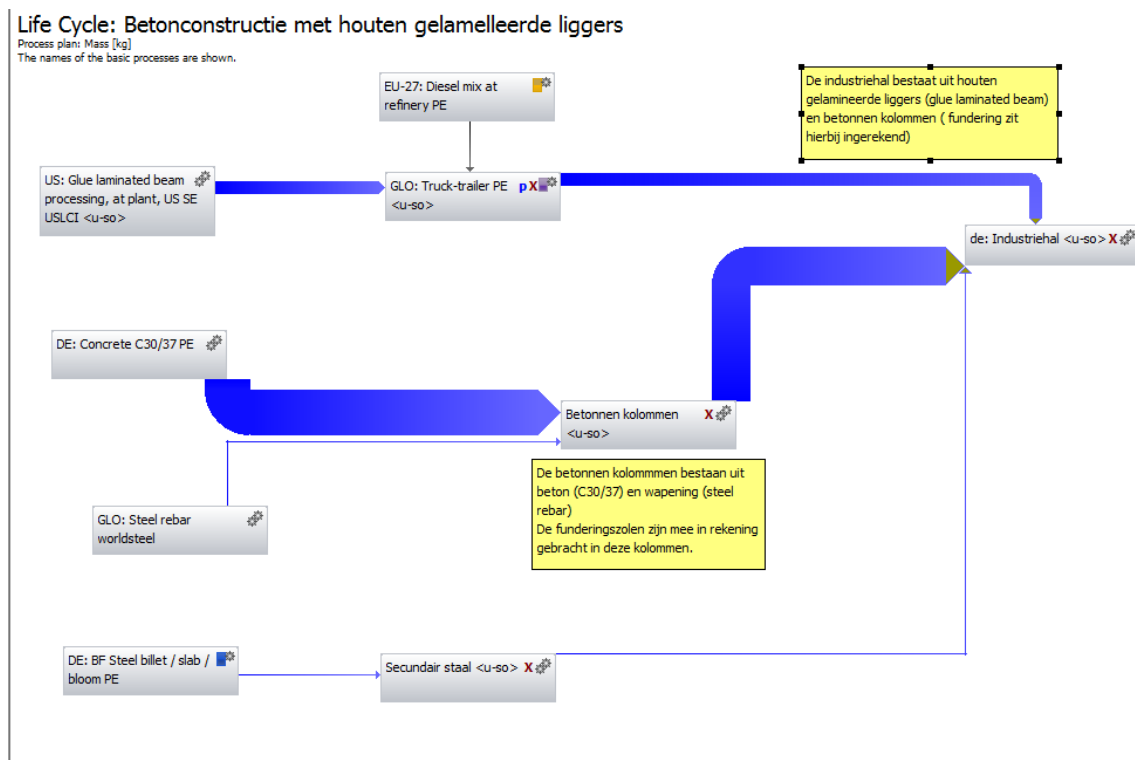
Om de inventaris analyse uit te voeren bij de industriehal van staal wordt vanaf wieg tot fabriekspoort (*cradle to gate*) de levenscyclus geanalyseerd. Dit wil zeggen dat de gebruiksfase en einde-levensfase niet in rekening wordt gebracht. Deze twee fasen worden niet in rekening gebracht, aangezien er niet gedefinieerd is welke bedrijfsactiviteit zal worden uitgevoerd in de gebruiksfase. Figuur 62 geeft het plan van deze levenscyclus van de staalstructuur weer.



Figuur 62: Levenscyclus staalstructuur

5.2.2 Betonstructuur met houten gelamelleerde liggers

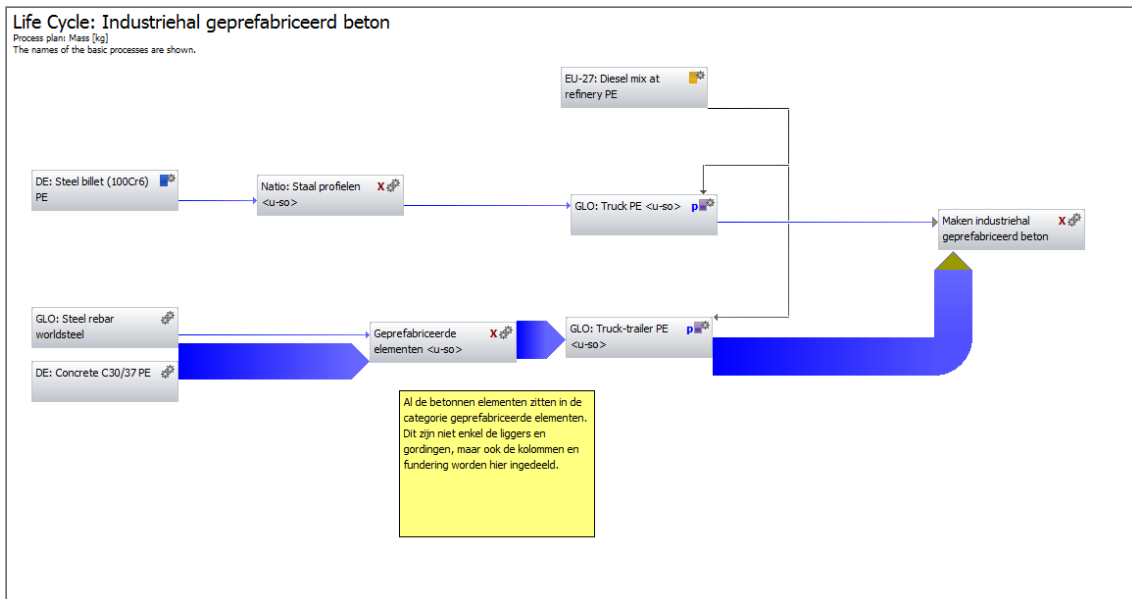
Het plan van de levenscyclus van de betonstructuur met houten gelamelleerde liggers is weergegeven in figuur 63. Zoals in dit plan te zien, zijn er drie *inputs* bij het *process* Industriebal. Als eerste de gelamelleerde liggers, vervolgens de betonnen kolommen die het grootste deel van het gewicht in de structuur opnemen. Dit is te zien aan de dikte van de lijnen van de verschillende *flows*. Tenslotte is er nog een laatste *input* op de industriebal genaamd secundair staal. Dit is het staal dat gebruikt wordt bij de windverbanden en drukkokers in de structuur.



Figuur 63: Levenscyclus betonconstructie met houten gelamelleerde liggers

5.2.3 Geprefabriceerde betonstructuur

De laatste constructie waar een levenscyclusanalyse is op uitgevoerd is de geprefabriceerde betonstructuur zoals te zien in figuur 64. Het grootste aandeel van gewicht in het totaalpakket is natuurlijk het geprefabriceerde beton. Het secundair staal is bijna verwaarloosbaar, maar om een objectieve vergelijking te kunnen maken is het wel in rekening gebracht. De fundering en kolommen zijn eveneens inbegrepen bij de geprefabriceerde elementen, omdat ze qua materiaal hetzelfde zijn. Er hoeft geen aparte beton -en wapening *process* aangemaakt worden hiervoor.



Figuur 64: Levenscyclus geprefabriceerde betonstructuur

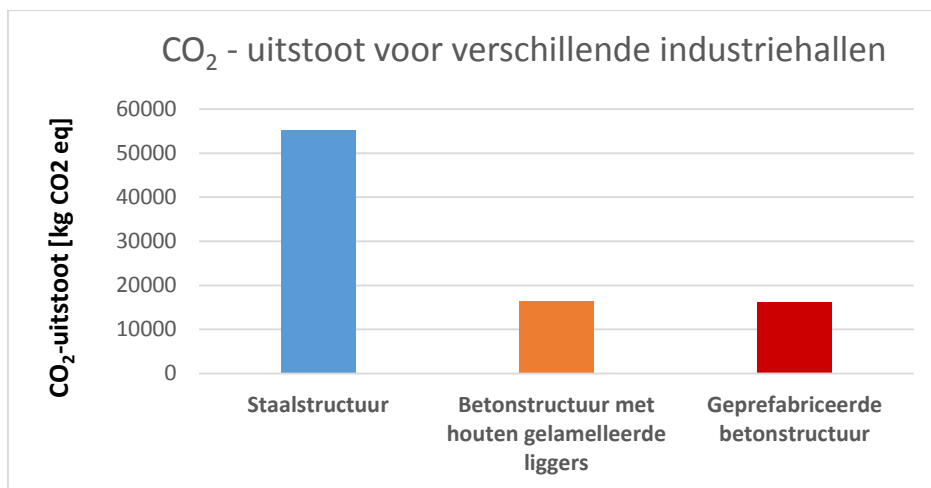
5.3 Berekening van de impact over de hele levenscyclus

Om de impact op het milieu te berekenen wordt er gebruikt gemaakt van LCIA, oftewel Life Cycle Impact Assessment. In deze fase zijn er twee belangrijke stappen. De eerste stap is de classificatie van de verschillende emissies en bronnen die later gekoppeld kunnen worden aan impact categorieën zoals GWP (global warming problem). Er wordt dus nagegaan welke stoffen bijdrage leveren aan de totale milieu impact. De tweede stap noemt men de karakterisering. Hierbij wordt iedere stof die een bijdrage heeft op de milieu impact gekenmerkt door een equivalente eenheid. Bij het probleem van globale opwarming is enkel de CO₂ uitstoot maatgevend. Iedere stof zal dus uitgedrukt worden in kg CO₂ equivalent. Dit wordt gedaan door middel van karakteriseringsfactor. Deze factoren zijn bepaald door verscheidene onderzoeken met verschillende methodologie. [19]

De impact beoordeling wordt verder niet besproken aangezien dit niet relevant is voor dit onderzoek, maar deze stap is dus wel nodig om de uiteindelijke interpretatie uit te kunnen voeren.

5.4 Interpretatie van impact van de levenscyclus

De resultaten van het softwarepakket GaBi Om de resultaten te vergelijken is de totale CO₂ –uitstoot van de drie verschillende standaard industriehallen weergegeven in figuur 65. Zoals te zien is de CO₂-uitstoot van de staalstructuur zéér groot ten opzichte van de twee andere structuren. De reden van dit probleem heeft te maken met het productieproces van het staal en de stoffen en gassen dat het staal en het productieproces bevat. De karakteriseringsfactor zal dus een pak groter zijn bij de stoffen en gassen die bij het productieproces van staal aanwezig zijn. Ook de hoeveelheid staal heeft een grote impact op de CO₂-uitstoot.



Figuur 65: CO₂-uitstoot voor verschillende standaard industriehallen

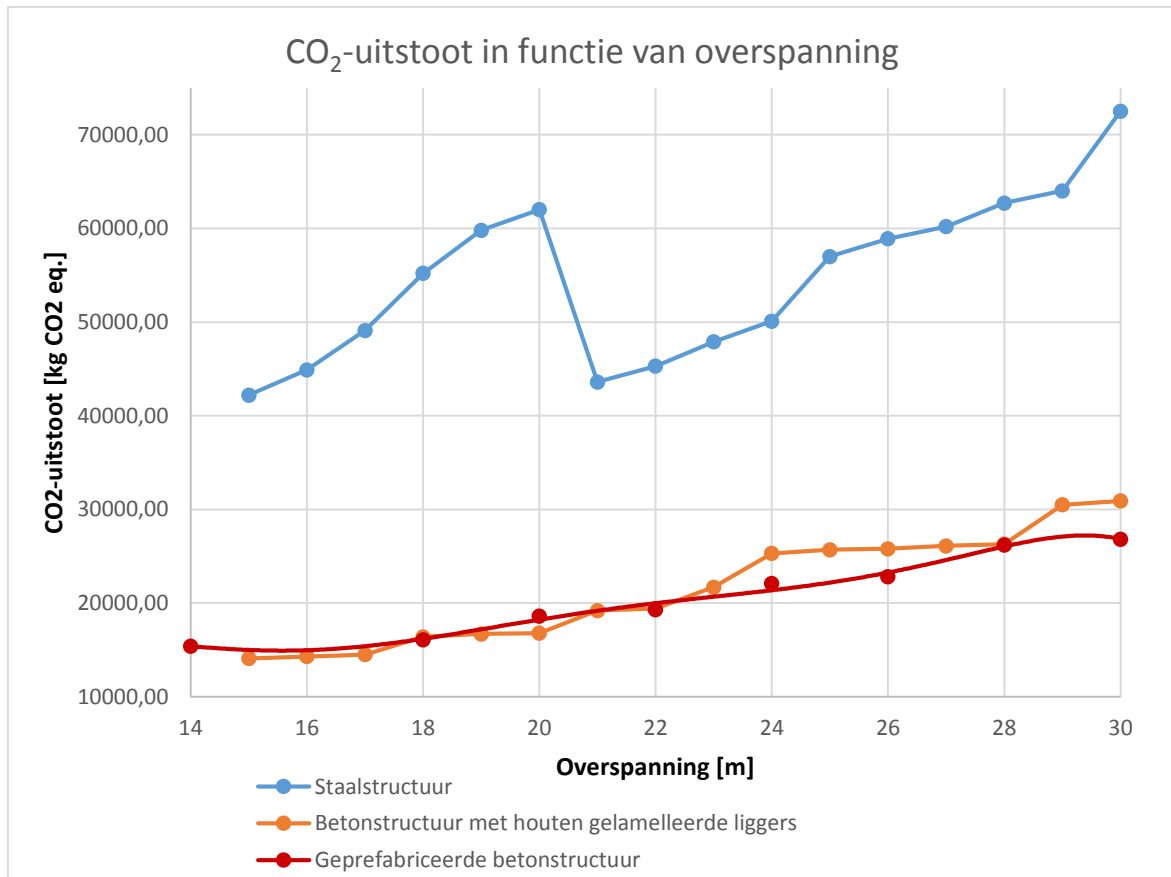
Net zoals bij die prijsbepaling van de structuren, is de levenscyclusanalyse voor alle verschillende overspanningen uitgevoerd. De hoeveelheden van de *inputs* zijn afhankelijk van het totale gewicht in de structuur. Deze hoeveelheden zijn voor de drie verschillende structuren weergegeven in bijlage 6-8. De grafieken van de CO₂-uitstoot zijn eveneens in deze bijlagen weergegeven.

Tabel 27 bevat voor de drie verschillende structuren de totale CO₂-uitstoot voor de overspanningen. Des te groter de overspanning zal worden, des te meer materiaal verwerkt wordt in het productieproces waardoor de CO₂-uitstoot eveneens groter wordt. Bij de geprefabriceerde betonstructuur is enkel gerekend met de overspanningen waarbij de prijsbepaling is uitgerekend, omdat er geen gegevens zijn over het gewicht van de liggers tussen deze overspanningen.

Tabel 27: Totale CO₂-uistoot voor verschillende industriehallen

Overspanning [m]	Staalstructuur [kg CO ₂ eq.]	Betonstructuur met houten gelamelleerde liggers [kg CO ₂ eq.]	Geprefabriceerde betonstructuur [kg CO ₂ eq.]
14			15400,00
15	42200,00	14100,00	
16	44900,00	14300,00	
17	49100,00	14500,00	
18	55200,00	16400,00	16100,00
19	59800,00	16700,00	
20	62000,00	16800,00	18600,00
21	43600,00	19200,00	
22	45300,00	19400,00	19300,00
23	47900,00	21700,00	
24	50100,00	25300,00	22100,00
25	57000,00	25700,00	
26	58900,00	25800,00	22800,00
27	60200,00	26100,00	
28	62700,00	26300,00	26200,00
29	64000,00	30500,00	
30	72500,00	30900,00	26800,00

Figuur 66 toont het verloop van de CO₂-uitstoot in functie van de overspanning, met de gegevens van bovenstaande tabel. Zoals te zien in deze figuur is de staalstructuur de meest milieu belastende structuur. Dit komt door het productieproces van het staal zoals eerder verklaard. De CO₂-uitstoot van de twee andere structuren blijven relatief dicht bij elkaar voor het grootste deel van de overspanningen. Zoals te zien is bij overspanningen van 23 meter tot 27 meter de geprefabriceerde betonstructuur minder milieu belastend als de betonstructuur met houten gelamelleerde liggers. De curve van de staalstructuur volgt hetzelfde verloop als de prijsbepaling van deze structuur. Dit is te verklaren door het feit dat het staal in deze structuur meer impact heeft dan het beton van de fundering. Hierdoor wordt er bijna enkel gerekend met de milieu-impact van het staal.



Figuur 66: CO₂-uitstoot in functie van overspanning

6 Algemeen resultaat

Figuur 67 op volgende pagina geeft de totale kostprijs en CO₂-uitstoot van de drie verschillende structuren weer in functie van de overspanning. De primaire verticale as bevat de kostprijs, terwijl de secundaire verticale as de CO₂-uitstoot aanduidt. De grafiek is net zoals bij de prijsbepaling in drie verschillende zones ingedeeld.

In zone A is het duidelijk dat de betonstructuur met houten gelamelleerde liggers het economisch meest voordelig is. Wanneer de milieu-impact ook een rol speelt is te zien dat de CO₂-uitstoot van deze structuur ook zeer laag is. Bij kleine overspanningen zal deze structuur altijd de voorkeur genieten.

De schemerzone (zone B) bevat de overspanningen waar de prijs nagenoeg gelijk is voor de drie verschillende structuren. Echter is de CO₂-uitstoot van de geprefabriceerde betonstructuur hier lager dan deze van de betonstructuur met houten gelamelleerde liggers. Er kan besloten worden dat de geprefabriceerde betonstructuur voor middelmatige overspanningen de meest optimale structuur is.

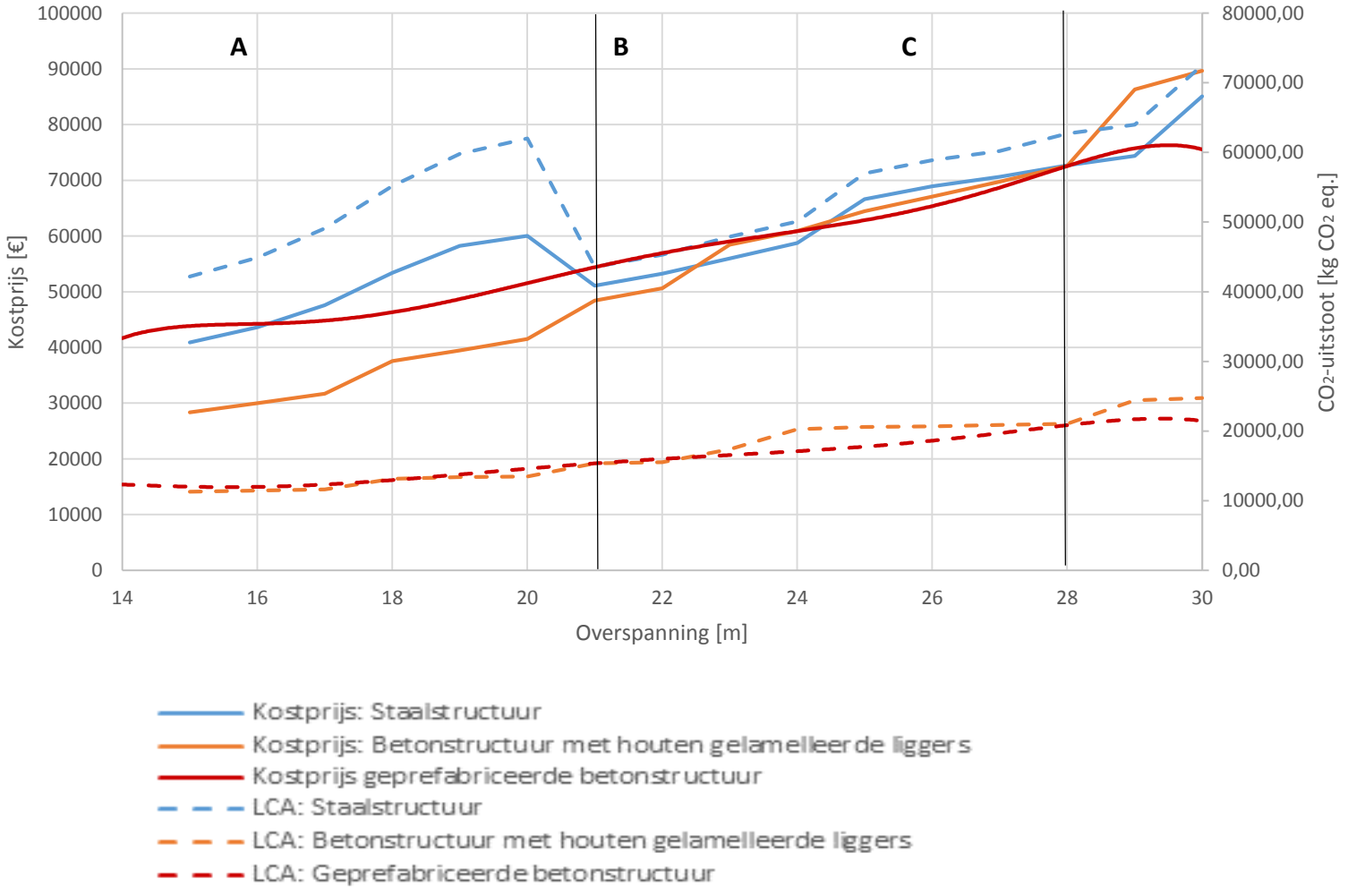
Als laatste is er de zone met de grotere overspanningen (zone C). Terwijl in zone A de betonstructuur met houten gelamelleerde liggers economisch nog het meest voordelig was, is bij deze zone juist het omgekeerde van toepassing. De geprefabriceerde betonstructuur is hier het meest prijsvoordelige materiaal. Ook op basis van de milieu-impact geniet deze structuur de voorkeur. Dit alles is samengevat in tabel 28.

Er kan niet eenduidig gezegd worden dat één soort structuur overal het beste is. Niet op het gebied van kostprijs, evenmin op basis van de levenscyclusanalyse. Wanneer de milieubelasting voor een klant primeert, is het aangeraden om geen staalstructuur te kiezen, aangezien de CO₂-uitstoot van deze structuur zéér hoog is. Wanneer de prijs primeert, hangt de keuze van materiaal af van de totale overspanning. Een opmerking hierbij is dat deze prijs de kostprijs per meter overspanning is, gerekend met een lengte van de hal van 40 meter. Als deze afstand in de praktijk groter wordt, kan er beter overgeschakeld worden naar de grafiek met de kostprijs per vierkante meter, zoals te zien in 4.5.4.

Tabel 28: Meest optimale materiaal per zone

	Optimalisatie volgens prijs	Optimalisatie volgens LCA
Zone A	- Betonstructuur met houten gelamelleerde liggers	- Geprefabriceerde betonstructuur - Betonstructuur met houten gelamelleerde liggers
Zone B	- Schemerzone (prijzen ongeveer gelijk)	- Geprefabriceerde betonstructuur
Zone C	- Geprefabriceerde betonstructuur	- Geprefabriceerde betonstructuur

Kostprijs en CO₂-uitstoot in functie van overspanning



Figuur 67: Kostprijs en CO₂-uitstoot in functie van overspanning

Besluit

Vanuit stabiliteitsbureau V2S is de vraag gekomen om een hulpmiddel aan te reiken bij het ontwerpen van industriehallen. Ieder constructiemateriaal heeft verschillende voor- en nadelen. Deze zijn bijvoorbeeld de brandweerstand, de snelheid in het bouwproces van geprefabriceerd beton, flexibiliteit en aanpasbaarheid van staal. Het hulpmiddel dat aangereikt is een grafiek, rekening houdende met het economische aspect voor verschillende overspanningen. De kostprijzen van de draagstructuur voor de verschillende hallen wordt uitgezet in functie van de overspanning. De resultaten zijn samen te vatten in bijlage 9.

Uit de grafiek blijkt dat in zone A een industriehal met betonnen kolommen en gelamelleerde liggers de voorkeur geniet. Bij overspanningen vanaf 28 meter (zone C) genieten prefab betonnen liggers en kolommen de voorkeur. Overspanningen tussen 21 meter en 28 meter vallen in een schemerzone waarin de verschillende materialen niet veel van elkaar verschillen op het vlak van kostprijs.

Wat betreft de milieu-impact kan gesteld worden dat een betonstructuur met gelamelleerde houten liggers en de geprefabriceerde betonstructuur het meest voordelig is. De impact van een staalstructuur ligt veel hoger dan de overige twee structuren zoals te zien in bijlage 9. Hier speelt voornamelijk het milieubelastende productieproces van staalprofielen op.

Deze conclusies stemmen overeen met de vaststelling dat meer en meer nieuwe industriehallen uitgevoerd worden in prefab beton of gelamelleerde houten liggers. Verwachting na deze masterproef is dat deze trend zich gaat doorzetten in de toekomst.

Dit onderzoek heeft zich beperkt tot overspanningen tussen 15 meter en 30 meter. Een mogelijk aanvullend onderzoek is dit van grotere of kleinere overspanningen. De grafiek toont aan dat er de verschillen in kostprijs van de draagstructuur oplopen bij deze kleinere of grotere overspanningen.

Een tweede mogelijke aanvulling is de uitbreiding van de analyse van de milieu-impact. In dit onderzoek werd dit beperkt van de oorsprong van de materialen tot de fabricage van de industriehal. Deze analyse kan uitgebreid worden tot het onderhoud van de materialen en de verwerking ervan bij afbraak.

Bibliografie

- [1] B. Kelchtermans, „V2S Stabiliteit,” V2S, 2015. [Online]. Available: <http://www.v2s.be/>. [Geopend 10 December 2014].
- [2] „NBN EN 1991-1-1 ANB: Belastingen op constructies,” September 2007. [Online]. [Geopend 2015].
- [3] B. v. Normalisatie, „NBN EN 1992-1-1: Ontwerp en berekening van betonconstructies,” standards for.be, Brussel, 2005.
- [4] Derix, „Gelamineerde houtconstructies - Toepassing van het materiaal voor grote overspanningen,” Derix, [Online]. Available: <http://www.derix.de/nl/>.
- [5] W. Naessens, „Betonstructuren,” [Online]. Available: <http://www.industriebouw.be/nl/industriebouw/technische-catalogus>. [Geopend 21 Maart 2015].
- [6] i. K. Defruyt, „Febe,” 2015. [Online]. Available: www.febe.be. [Geopend 27 April 2015].
- [7] Katholieke hogeschool Mechelen, „Levenscyclusanalyse - LCA,” Ecodesign, [Online]. Available: <http://www.ecodesign.be/content/levenscyclusanalyse-lca>. [Geopend 2015].
- [8] R. Projects, „REI Projects: uw partner in brandveiligheid,” REI Projects, 2015. [Online]. Available: <http://www.rei-projects.be/nl>. [Geopend 15 Januari 2015].
- [9] H. Linhai, T. Qinghua en S. Tianyi, „Fire performance of steel reinforced concrete (SRC) structures,” Elsevier, Tsinghua University, Beijing, China, 2013.
- [10] CEN, „Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-1: General actions - Densities, self-weight, imposed loads for buildings, NBN EN 1991-1-1 (+ AC:2009),” 2002.
- [11] „atab IKO Group,” [Online]. Available: <http://www.atab.com/polygum-power-daksystemen/>. [Geopend Mei 2015].
- [12] CEN, „Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions - National annex, NBN EN 1991-1-4 ANB,” 2010.
- [13] CEN, „Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-3: General actions - Snow loads, NBN EN 1991-1-3 ANB,” 2007.
- [14] BuildSoft, „Aan de slag met Diamonds,” [Online]. Available: <http://www.buildsoft.eu/nl/product/diamonds>. [Geopend 18 Februari 2015].

2015].

[15] i. P. Baekeland, „Toledo U Hasselt,“ 2015.

[16] L. Schouteden, Interviewee, *Informatie industriehallen*. [Interview]. 2015.

[17] I. K. Defruyt en S. Maas, *Veel gebruikte Prefabproducten, een wereld van mogelijkheden*, Universiteit Hasselt, 2015.

[18] J. Cools, Interviewee, *Informatie over prefab betonstructuren*. [Interview]. 22 April 2015.

[19] GaBi Software, „Introduction to LCA,“ 2015.

Bijlagen

Bijlage 1: MEGATON IV-balken

Bijlage 2: Profielen en gewichten vollwandliggers bij staalstructuur

Bijlage 3: Profielen en gewichten vakwerkliggers bij staalstructuur

Bijlage 4: Betonstructuur met houten gelamelleerde liggers
volumebepaling

Bijlage 5: Geprefabriceerde betonstructuur gewichten en volumebepaling

Bijlage 6: CO₂-uitstoot in functie van overspanning bij staalstructuur

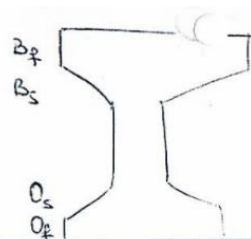
Bijlage 7: CO₂-uitstoot in functie van overspanning bij betonstructuur met
houten gelamelleerde liggers

Bijlage 8: CO₂-uitstoot in functie van overspanning bij geprefabriceerde
betonstructuur

Bijlage 9: Kostprijs en milieu-impact in functie van overspanning

Bijlage 10: Rekennota's standaardindustriehal (zie CD-ROM)

Bijlage 1: MEGATON IV-balken



MEGATON IV-Balken

Type	Helling	B onder	B boven	Bf	Bs	Os	Of	Lijfdikte t	Mld Hgte	Lmin	I-lengte	Lmax	EG(kN/m)	RF (min)	Lmin 1zijde	Lmax 1zijde
------	---------	---------	---------	----	----	----	----	-------------	----------	------	----------	------	----------	----------	-------------	-------------

STEELDECK

IV 40 / 80 - 5%	5%	40	40	8	13	13	8	8	80	950	900	1396	3,85	60	475	698
IV 40 / 90 - 5%	5%	40	40	8	13	13	8	8	90	1350	1300	1796	4,06	60	675	898
IV 40 / 100 - 5%	5%	40	40	8	13	13	8	8	100	1750	1700	2396	4,23	60	875	1198
IV 40 / 110 - 5%	5%	40	40	8	13	13	8	8	110	2150	2100	2796	4,29	60	1075	1398
IV 40 / 120 - 5%	5%	40	40	8	13	13	8	8	120	2550	2500	3196	4,36	60	1275	1598
IV 45 / 100 - 5%	5%	45	45	8	13	13	8	13	100	1750	1700	2396	5,20	120	875	1198
IV 45 / 110 - 5%	5%	45	45	8	13	13	8	13	110	2150	2100	2796	5,33	120	1075	1398
IV 45 / 120 - 5%	5%	45	45	8	13	13	8	13	120	2600	2500	3196	5,40	120	1300	1598
IV 50 / 130 - 5%	5%	50	50	8	13	13	8	9	130	2500	2400	3196	5,62	60	1250	1598
IV 50 / 140 - 5%	5%	50	50	8	13	13	8	9	140	2900	2800	3596	5,83	60	1450	1798
IV 50 / 150 - 5%	5%	50	50	8	13	13	8	9	150	3300	3200	3996	5,90	60	1650	1998
IV 50 / 160 - 5%	5%	50	50	8	13	13	8	9	160	3700	3600	4396	5,99	60	1850	2198
IV 50 / 160 - 5%	5%	50	50	8	13	13	8	9	160	3200	3100	4396	6,69	60	1600	2198
IV 50 / 170 - 5%	5%	50	50	8	13	13	8	9	170	3600	3500	4396	6,66	60	1800	2198
IV 50 / 180 - 5%	5%	50	50	8	13	13	8	9	180	4000	3900	5196	6,72	60	2000	2598
IV 55 / 130 - 5%	5%	55	55	8	13	13	8	14	130	2500	2400	3196	7,01	120	1250	1598
IV 55 / 140 - 5%	5%	55	55	8	13	13	8	14	140	2900	2800	3596	7,13	120	1450	1798
IV 55 / 150 - 5%	5%	55	55	8	13	13	8	14	150	3300	3200	3996	7,27	120	1650	1998
IV 55 / 160 - 5%	5%	55	55	8	13	13	8	14	160	3700	3600	4396	7,42	120	1850	2198
IV 55 / 160 - 5%	5%	55	55	8	13	13	8	14	160	3200	3100	4396	8,03	120	1600	2198
IV 55 / 170 - 5%	5%	55	55	8	13	13	8	14	170	3600	3500	4396	8,09	120	1800	2198
IV 55 / 180 - 5%	5%	55	55	8	13	13	8	14	180	4000	3900	5196	8,24	120	2000	2598

5% BALKEN

IV 30 / 75 - 5%	5%	30	30	15	5	11	15	8	75	750	700	1196	3,67	60	375	598
IV 30 / 85 - 5%	5%	30	30	15	5	11	15	8	85	1150	1100	1596	3,72	60	575	798
IV 30 / 95 - 5%	5%	30	30	15	5	11	15	8	95	1550	1500	1996	3,80	60	775	998
IV 30 / 105 - 5%	5%	30	30	15	5	11	15	8	105	1150	1100	1596	4,34	60	575	798
IV 30 / 115 - 5%	5%	30	30	15	5	11	15	8	115	1550	1500	1996	4,37	60	775	998
IV 30 / 125 - 5%	5%	30	30	15	5	11	15	8	125	1950	1900	2396	4,43	60	975	1198
IV 30 / 135 - 5%	5%	30	30	15	5	11	15	8	135	2400	2300	2550	4,42	60	1200	1275
													0,00			
IV 35 / 75 - 5%	5%	35	35	15	5	11	15	13	75	750	700	1196	4,49	120	375	598
IV 35 / 85 - 5%	5%	35	35	15	5	11	15	13	85	1150	1100	1596	4,60	120	575	798

Bijlage 2: Profielen en gewichten vollewandliggers bij staalstructuur

Overspanning [m]	Kolommen langsgevel	Aantal	Gewicht Profiel [kg]	Totaal gewicht [kg]	Kolommen kopgevel	Aantal	Gewicht Profiel [kg]	Totaal gewicht [kg]
15	IPE330	14	49,1	4124,4	IPE240	6	30,7	1105,2
16	IPE360	14	57,1	4796,4	IPE240	6	30,7	1105,2
17	IPE360	14	57,1	4796,4	IPE240	6	30,7	1105,2
18	IPE450	14	77,6	6518,4	IPE240	6	30,7	1105,2
19	IPE450	14	77,6	6518,4	IPE240	6	30,7	1105,2
20	IPE450	14	77,6	6518,4	IPE240	6	30,7	1105,2

Overspanning [m]	Kolommen hoeken	Aantal	Gewicht Profiel [kg]	Totaal gewicht [kg]	Langsliggers	Aantal	Gewicht Profiel [kg]	Totaal gewicht [kg]
15	HEA140	4	24,7	592,8	IPE360	7	57,1	5995,5
16	HEA140	4	24,7	592,8	IPE360	7	57,1	6395,2
17	HEA140	4	24,7	592,8	IPE400	7	66,3	7889,7
18	HEA160	4	30,4	729,6	IPE400	7	66,3	8353,8
19	HEA160	4	30,4	729,6	IPE450	7	77,6	10320,8
20	HEA160	4	30,4	729,6	IPE450	7	77,6	10864

Overspanning [m]	Kopliggers	Aantal	Gewicht Profiel [kg]	Totaal gewicht [kg]	Windverbanden	Aantal [m]	Gewicht Profiel [kg]	Totaal gewicht [kg]
15	HEA220	2	50,5	1515	L60*60*6	371,034	5,4	2003,581
16	HEA220	2	50,5	1616	L60*60*6	378,225	5,4	2042,413
17	HEA220	2	50,5	1717	L60*60*6	385,702	5,4	2082,789
18	HEA220	2	50,5	1818	L60*60*6	393,445	5,4	2124,604
19	HEA220	2	50,5	1919	L60*60*6	401,437	5,4	2167,760
20	HEA220	2	50,5	2020	L60*60*6	409,660	5,4	2212,163

Overspanning [m]	Drukkokers	Aantal [stuk]	Gewicht Profiel [kg]	Totaal gewicht [kg]	Netto Totaal gewicht [kg]	Toeslag 1 [kg]	Toeslag 2 [kg]	Totaal gewicht [kg]
15	SHS80*80*3	56	7,1	1988	17324,481	1385,958	1039,469	19749,908
16	SHS80*80*3	56	7,1	1988	18536,013	1482,881	1112,161	21131,054
17	SHS80*80*3	56	7,1	1988	20171,889	1613,751	1210,313	22995,953
18	SHS80*80*3	56	7,1	1988	22637,604	1811,008	1358,256	25806,869
19	SHS80*80*3	56	7,1	1988	24748,760	1979,901	1484,926	28213,586
20	SHS80*80*3	56	7,1	1988	25437,363	2034,989	1526,242	28998,593

Overspanning [m]	Funderingszool	Volume [m³]
15	100*100*40 en 80*80*40	8,16
16	100*100*40 en 80*80*40	8,16
17	110*110*40 en 80*80*40	9,336
18	120*120*40 en 80*80*40	10,624
19	120*120*40 en 80*80*40	10,624
20	130*130*40 en 80*80*40	12,024

Bijlage 3: Profielen en gewichten vakwerkliggers bij staalstructuur

Overspanning [m]	Profiel kopligger	Gewicht /m [kg/m]	Gewicht [kg]	Profiel kopkolom	Gewicht /m [kg/m]	Gewicht [kg]	Profiel hoekkolom	Gewicht /m [kg/m]	Gewicht [kg]
21	HEA220	50,5	2121	IPE270	36,1	1547,97	HEA140	24,7	691,6
22	HEA220	50,5	2222	IPE270	36,1	1547,97	HEA140	24,7	691,6
23	HEA240	60,3	2773,8	IPE270	36,1	1547,97	HEA140	24,7	691,6
24	HEA240	60,3	2894,4	IPE270	36,1	1559,52	HEA140	24,7	691,6
25	HEB220	71,5	3575	IPE270 (#6)	36,1	1602,12	HEA160	30,4	875,52
				IPE300 (#4)	42,2	1228,86			
26	HEB220	71,5	3718	IPE270 (#6)	36,1	1602,12	HEA160	30,4	875,52
				IPE300 (#4)	42,2	1228,86			
27	HEB220	71,5	3861	IPE270 (#6)	36,1	1612,95	HEA160	30,4	881,6
				IPE300 (#4)	42,2	1237,3			
28	HEB220	71,5	4004	IPE270 (#6)	36,1	1612,95	HEA160	30,4	881,6
				IPE300 (#4)	42,2	1237,3			

29	HEB220	71,5	4147	IPE270 (#6)	36,1	1623,78	HEA160	30,4	887,68
				IPE300 (#4)	42,2	1245,74			
30	HEB240	83,2	4992	IPE300 (#6)	42,2	1898,16	HEA160	30,4	887,68
				IPE330 (#4)	49,1	1449,43			

Overspanning [m]	Profiel langskolom	Gewicht /m [kg/m]	Gewicht [kg]	Vakwerk bovenligger	Vakwerk onderligger	Vakwerk diagonaal	Gewicht /portiek [kg/portiek]	Gewicht [kg]
21	HEA140	24,7	2420,6	SHS 120x120x10	UPN160	SHS 40x40x4 (#42)	1262,2	8835,4
						SHS 50x50x4 (#56)		
						SHS 60x60x4 (#42)		
22	HEA140	24,7	2420,6	SHS 120x120x10	UPN 160 (#28)	SHS 40x40x4 (#70)	1367,1	9569,7
					UPN 180 (#42)	SHS 60x60x4 (#56)		
						SHS 80x80x4 (#14)		
23	HEA140	24,7	2420,6	SHS 120x120x10	UPN 160 (#28)	SHS 40x40x4 (#70)	1425,6	9979,2
					UPN 180 (#42)	SHS 60x60x4 (#56)		
						SHS 80x80x4 (#14)		
24	HEA140	24,7	2420,6	SHS 150x150x8	UPN 180 (#42)	SHS 40x40x4 (#70)	1560	10920
					UPN 200 (#28)	SHS 60x60x4 (#56)		
						SHS 80x80x4 (#14)		

25	HEA140	24,7	2489,76	SHS 150x150x8	UPN 180 (#42)	SHS 40x40x4 (#42)	1591,8	11142,6
					UPN 160 (#20)	SHS 60x60x4 (#84)		
					UPN 220 (#8)	SHS 80x80x4 (#14)		
26	HEA140	24,7	2489,76	SHS 150x150x8	UPN 180 (#50)	SHS 40x40x4 (#42)	1701,5	11910,5
					UPN 200 (#12)	SHS 60x60x4 (#56)		
					UPN 240 (#8)	SHS 80x80x4 (#42)		
27	HEA140	24,7	2507,05	SHS 150x150x8	UPN 180 (#50)	SHS 40x40x4 (#42)	1766,9	12368,3
					UPN 200 (#8)	SHS 60x60x4 (#56)		
					UPN 220 (#4)	SHS 80x80x4 (#42)		
					UPN 240 (#8)			
28	HEA140	24,7	2507,05	SHS 150x150x8	UPN 180 (#50)	SHS 40x40x4 (#42)	1837,1	12859,7
					UPN 200 (#8)	SHS 60x60x4 (#56)		
					UPN 220 (#4)	SHS 80x80x4 (#28)		
					UPN 260 (#8)	SHS 100x100x4 (#14)		
29	HEA140	24,7	2524,34	SHS 150x150x8	UPN 180 (#50)	SHS 40x40x4 (#42)	1902,9	13320,3
					UPN 200 (#8)	SHS 60x60x4 (#56)		
					UPN 220 (#4)	SHS 80x80x4 (#28)		
					UPN 260 (#8)	SHS 100x100x4 (#14)		
30	HEA140	24,7	2524,34	SHS 150x150x10	UPN 180 (#50)	SHS 40x40x4 (#42)	2327,9	16295,3
					UPN 200 (#8)	SHS 60x60x4 (#56)		
					UPN 220 (#4)	SHS 80x80x4 (#28)		
					UPN 260 (#8)	SHS 100x100x4 (#14)		

Overspanning [m]	Profiel drukkoker	Gewicht /m [kg/m]	Gewicht [kg]	Profiel windverband	Gewicht [kg]	Totaal gewicht staal [kg]
21	SHS 80x80x3	7,1	1988	L 60x60x6	2404,41	20008,978

22	SHS 80x80x3	7,1	1988	L 60x60x6	2455,11	20894,978
23	SHS 80x80x3	7,1	1988	L 60x60x6	2506,89	21908,058
24	SHS 80x80x3	7,1	1988	L 60x60x6	2559	23033,12
25	SHS 80x80x3	7,1	2541,8	L 60x60x6	2481,25	26053,912
	SHS 100x100x4 (#2)	11,7	117			
26	SHS 80x80x3	7,1	2541,8	L 60x60x6	2514	26997,562
	SHS 100x100x4 (#2)	11,7	117			
27	SHS 80x80x3	7,1	2541,8	L 60x60x6	2550,29	27677,292
	SHS 100x100x4 (#2)	11,7	117			
28	SHS 80x80x3	7,1	2541,8	L 60x60x6	2587,5	28348,902
	SHS 100x100x4 (#2)	11,7	117			
29	SHS 80x80x3	7,1	2541,8	L 60x60x6	2622,24	29029,882
	SHS 100x100x4 (#2)	11,7	117			

30	SHS 80x80x3	7,1	2541,8	L 60x60x6	2660,36	33366,068
	SHS 100x100x4 (#2)	11,7	117			

Overspanning [m]	Funderingszool langs	Aantal	Volume [m ³]	Funderingszool kop	Aantal	Volume [m ³]
21	110*110*40	14	6,776	90*90*40	10	3,24
22	110*110*40	14	6,776	90*90*40	10	3,24
23	120*120*40	14	8,064	90*90*40	10	3,24
24	120*120*40	14	8,064	90*90*40	10	3,24
25	120*120*40	14	8,064	100*100*40	14	5,6
26	120*120*40	14	8,064	100*100*40	14	5,6

27	120*120*40	14	8,064	100*100*40	14	5,6
28	130*130*40	14	9,464	110*110*40	14	6,776
29	130*130*40	14	9,464	110*110*40	14	6,776
30	130*130*40	14	9,464	110*110*40	14	6,776

Bijlage 4: Betonstructuur met houten gelamelleerde liggers volumebepaling

Volume liggers:

Overspanning [m]	h1 [m]	h2 [m]	Volume / ligger [m ³]	Volume tot. [m ³]
15	0,9375	0,5	1,725	15,525
16	1	0,5333	2,207952	19,871568
17	1,0625	0,5667	2,492676	22,434084
18	1,125	0,6	2,7945	25,1505
19	1,1875	0,6333	3,113568	28,022112
20	1,25	0,6667	3,45006	31,05054
21	1,3125	0,7	3,803625	34,232625
22	1,375	0,7333	4,174434	37,569906
23	1,4375	0,7667	4,562694	41,064246
24	1,5	0,8	4,968	44,712
25	1,5625	0,8333	5,9895	53,9055
26	1,625	0,8667	6,47842	58,30578
27	1,6875	0,9	6	62
28	1,75	0,9333	7,51324	67,61916
29	1,8125	0,9667	8,05968	72,53712
30	1,875	1	8,625	77,625

Berekening windverbanden:

Overspanning [m]	Breedte ligger [m]	# Liggers	Tussenafst. Portieken [m]	Hoogte hal [m]	Tussenafst. Kolommen kopgevel [m]	# Velden langsgevel	# Velden kopgevel
14		9	5	6	3,5	8	4
15	0,160	9	5	6	3,75	8	4
16	0,180	9	5	6	4	8	4
17	0,180	9	5	6	4,25	8	4
18	0,180	9	5	6	4,5	8	4
19	0,180	9	5	6	4,75	8	4
20	0,180	9	5	6	5	8	4
21	0,180	9	5	6	5,25	8	4
22	0,180	9	5	6	5,5	8	4
23	0,180	9	5	6	5,75	8	4
24	0,180	9	5	6	6	8	4
25	0,200	9	5	6	6,25	8	4
26	0,200	9	5	6	6,5	8	4
27	0,200	9	5	6	6,75	8	4
28	0,200	9	5	6	7	8	4
29	0,200	9	5	6	7,25	8	4
30	0,200	9	5	6	7,5	8	4

Overspanning [m]	Lengte langsgevel [m]	Lengte kopgevel [m]	Lengte dak [m]	Totale lengte [m]	Gewicht per lengte [kg/m]	Gewicht [kg]
14	62,482	55,570	244,131	362,183	5,42334	1964,240931
15	62,482	56,604	250,000	369,086	5,42334	2001,678239
16	62,482	57,689	256,125	376,296	5,42334	2040,779995
17	62,482	58,822	262,488	383,792	5,42334	2081,43373
18	62,482	60,000	269,072	391,554	5,42334	2123,533065
19	62,482	61,221	275,862	399,565	5,42334	2166,977896
20	62,482	62,482	282,843	407,807	5,42334	2211,674428
21	62,482	63,781	290,000	416,263	5,42334	2257,535086
22	62,482	65,115	297,321	424,919	5,42334	2304,478337
23	62,482	66,483	304,795	433,760	5,42334	2352,428452
24	62,482	67,882	312,410	442,774	5,42334	2401,315222
25	62,482	69,311	320,156	451,949	5,42334	2451,073649
26	62,482	70,767	328,024	461,274	5,42334	2501,643624
27	62,482	72,250	336,006	470,738	5,42334	2552,969607
28	62,482	73,756	344,093	480,331	5,42334	2605,000298
29	62,482	75,286	352,278	490,046	5,42334	2657,688337
30	62,482	76,837	360,555	499,875	5,42334	2710,989999

Gewichten secundair staal:

Overspanning [m]	Windverband [kg]	Drukkokers [kg]	Toeslag 1 [kg]	Toeslag 2 [kg]	Gewicht staal [kg]
15	2001,678239	1414,2	273,2702591	204,9526944	3894,1
16	2040,779995	1414,2	276,3983996	207,2987997	3938,7
17	2081,43373	1414,2	279,6506984	209,7380238	3985,0
18	2123,533065	1414,2	283,0186452	212,2639839	4033,0
19	2166,977896	1414,2	286,4942317	214,8706737	4082,5
20	2211,674428	1414,2	290,0699542	217,5524657	4133,5
21	2257,535086	1414,2	293,7388069	220,3041051	4185,8
22	2304,478337	1414,2	297,494267	223,1207002	4239,3
23	2352,428452	1414,2	301,3302762	225,9977071	4294,0
24	2401,315222	1414,2	305,2412178	228,9309133	4349,7
25	2451,073649	1414,2	309,2218919	231,9164189	4406,4
26	2501,643624	1414,2	313,26749	234,9506175	4464,1
27	2552,969607	1414,2	317,3735685	238,0301764	4522,6
28	2605,000298	1414,2	321,5360239	241,1520179	4581,9
29	2657,688337	1414,2	325,751067	244,3133002	4642,0
30	2710,989999	1414,2	330,0151999	247,5113999	4702,7

Volume beton en wapening:

Overspanning [m]	Betonkolom [mm]	L [mm]	B [mm]	Volume beton [m ³]	Wapening [kg]	Volume fund. langs [m ³]	Volume fund. kop [m ³]
15	250/250	250,00	250,00	9,00	1294,65	5,60	3,24
16	250/250	250,00	250,00	9,00	1294,65	5,60	3,24
17	250/250	250,00	250,00	9,00	1294,65	6,17	3,24
18	300/300	300,00	300,00	12,96	1864,30	6,17	3,24
19	300/300	300,00	300,00	12,96	1864,30	6,78	3,24
20	300/300	300,00	300,00	12,96	1864,30	6,78	3,24
21	350/350	350,00	350,00	17,64	2537,51	7,41	3,24
22	350/350	350,00	350,00	17,64	2537,51	7,41	3,24
23	400/400	400,00	400,00	23,04	3314,30	8,06	3,24
24	400/400	400,00	400,00	23,04	3314,30	8,75	3,61
25	400/400	400,00	400,00	23,04	3314,30	8,75	3,61
26	400/400	400,00	400,00	23,04	3314,30	8,75	3,61
27	400/400	400,00	400,00	23,04	3314,30	9,46	3,61
28	400/400	400,00	400,00	23,04	3314,30	9,46	3,61
29	450/450	450,00	450,00	29,16	4194,67	10,98	4,00
30	450/450	450,00	450,00	29,16	4194,67	11,77	4,00

Bijlage 5: Geprefabriceerde betonstructuur gewichten en volumebepaling

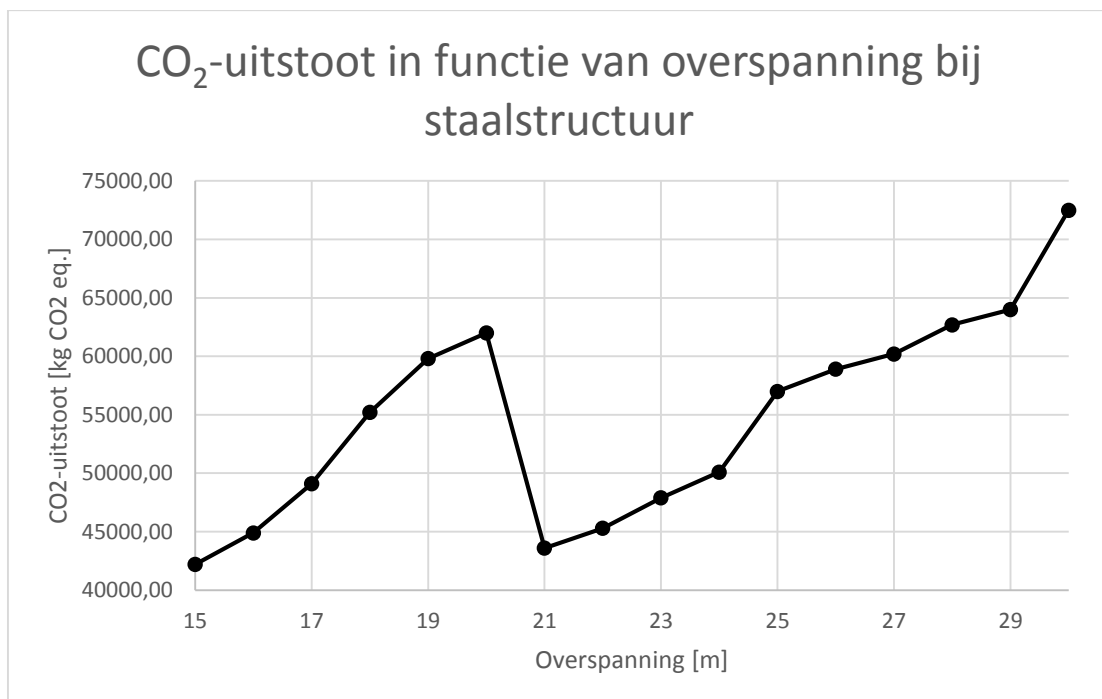
Overspanning [m]	Windverband [kg]	Toeslag 1 [kg]	Toeslag 2 [kg]	Gewicht staal [kg]
14	1964,240931	157,1392745	117,8544559	2239,2
18	2123,533065	169,8826452	127,4119839	2420,8
20	2211,674428	176,9339542	132,7004657	2521,3
22	2304,478337	184,358267	138,2687002	2627,1
24	2401,315222	192,1052178	144,0789133	2737,5
26	2501,643624	200,13149	150,0986175	2851,9
28	2605,000298	208,4000239	156,3000179	2969,7
30	2710,989999	216,8791999	162,6593999	3090,5

Overspanning [m]	Betonkolom [mm]	L [mm]	B [mm]	Volume betonnen kolom [m ³]	Volume betonnen balk [m ³]	Volume betonnen gording [m ³]
14	250/250	250	250	9,0	1,68	11,6
18	250/250	250	250	9,0	2,16	11,6
20	300/300	300	300	13,0	2,80	11,6
22	300/300	300	300	13,0	3,52	11,6
24	350/350	350	350	17,6	3,84	11,6
26	350/350	350	350	17,6	4,68	11,6
28	400/400	400	400	23,0	5,60	11,6
30	400/400	400	400	23,0	6,00	11,6

Overspanning [m]	Wapening [kg]	Volume fund. langs [m ³]	Volume fund. kop [m ³]
14	3204,98	8,06	3,24
18	3274,03	9,46	3,24
20	3935,74	10,21	3,24
22	4039,31	10,98	3,61
24	4758,56	11,77	4,00
26	4879,39	12,60	4,00
28	5788,52	13,45	4,41
30	5846,06	14,34	4,84

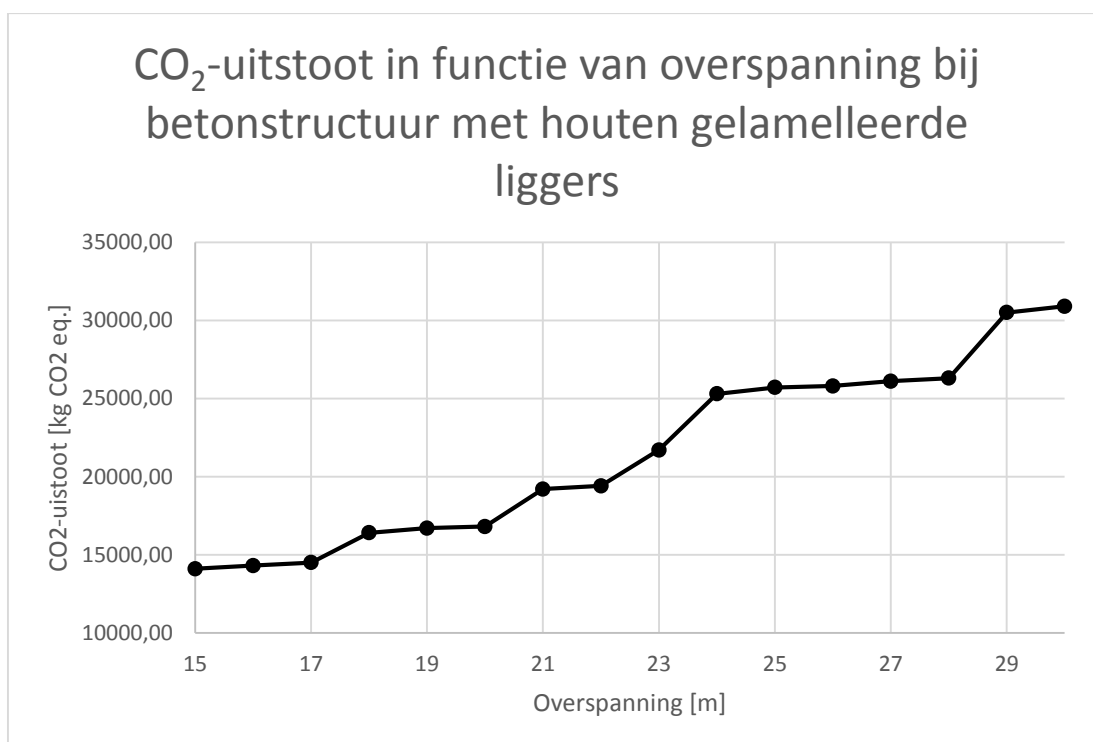
Overspanning [m]	Gewicht staal [kg]	Gewicht beton in funderingszool [kg]	Gewicht wapening in funderingszool [kg]	Totaal gewicht funderingszool [kg]	CO ₂ -uitstoot [kg CO ₂ eq.]
15	19749,91	19584,00	1173,82	20757,82	42200,00
16	21131,05	19584,00	1173,82	20757,82	44900,00
17	22995,95	22392,00	1342,12	23734,12	49100,00
18	25806,87	25497,60	1528,26	27025,86	55200,00
19	28213,59	25497,60	1528,26	27025,86	59800,00
20	28998,59	28857,60	1729,65	30587,25	62000,00
21	20008,98	24038,40	1440,80	25479,20	43600,00
22	20894,98	24038,40	1440,80	25479,20	45300,00
23	21908,06	27129,60	1626,08	28755,68	47900,00
24	23033,80	27129,60	1626,08	28755,68	50100,00
25	26053,91	32793,60	1965,57	34759,17	57000,00
26	26997,99	32793,60	1965,57	34759,17	58900,00
27	27677,29	32793,60	1965,57	34759,17	60200,00
28	28348,90	38976,00	2336,12	41312,12	62700,00
29	29029,88	38976,00	2336,12	41312,12	64000,00
30	33366,07	38976,00	2336,12	41312,12	72500,00

Bijlage 6: CO₂-uitstoot in functie van overspanning bij staalstructuur



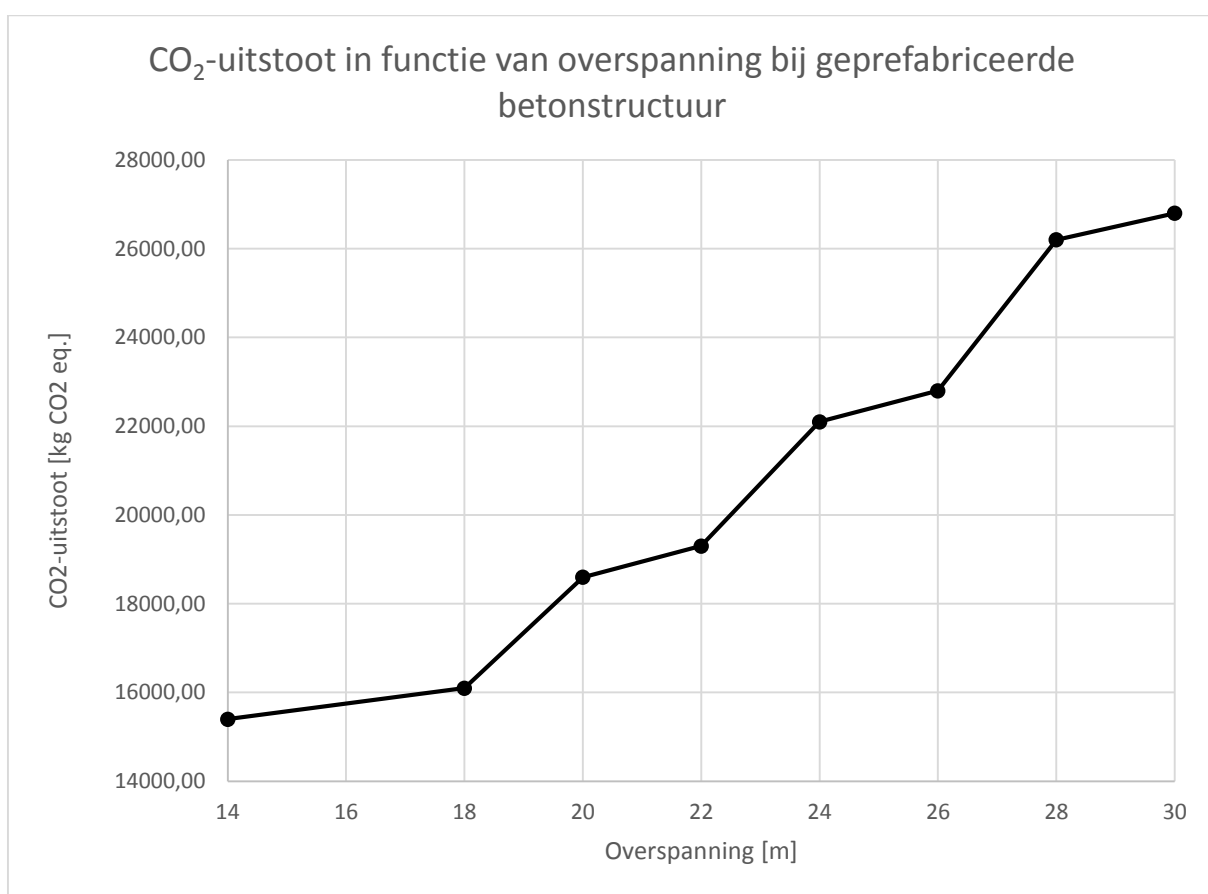
Bijlage 7: CO₂-uitstoot in functie van overspanning bij betonstructuur met houten gelamelleerde liggers

Overspanning [m]	Gewicht houten liggers [kg]	Gewicht secundair staal [kg]	Gewicht beton [kg]	Gewicht wapening [kg]	CO ₂ -uitstoot [kg CO ₂ eq.]
15	12420,00	3894,10	42816,00	1294,65	14100,00
16	15897,25	3938,68	42816,00	1294,65	14300,00
17	17947,27	3985,02	44193,60	1294,65	14500,00
18	20120,40	4033,02	53697,60	1864,30	16400,00
19	22417,69	4082,54	55142,40	1864,30	16700,00
20	24840,43	4133,50	55142,40	1864,30	16800,00
21	27386,10	4185,78	67886,40	2537,51	19200,00
22	30055,92	4239,29	67886,40	2537,51	19400,00
23	32851,40	4293,96	82425,60	3314,30	21700,00
24	35769,60	4349,69	84960,00	3314,30	25300,00
25	43124,40	4406,41	84960,00	3314,30	25700,00
26	46644,62	4464,06	84960,00	3314,30	25800,00
27	49600,00	4522,57	86673,60	3314,30	26100,00
28	54095,33	4581,89	86673,60	3314,30	26300,00
29	58029,70	4641,95	105926,40	4194,67	30500,00
30	62100,00	4702,72	107841,60	4194,67	30900,00

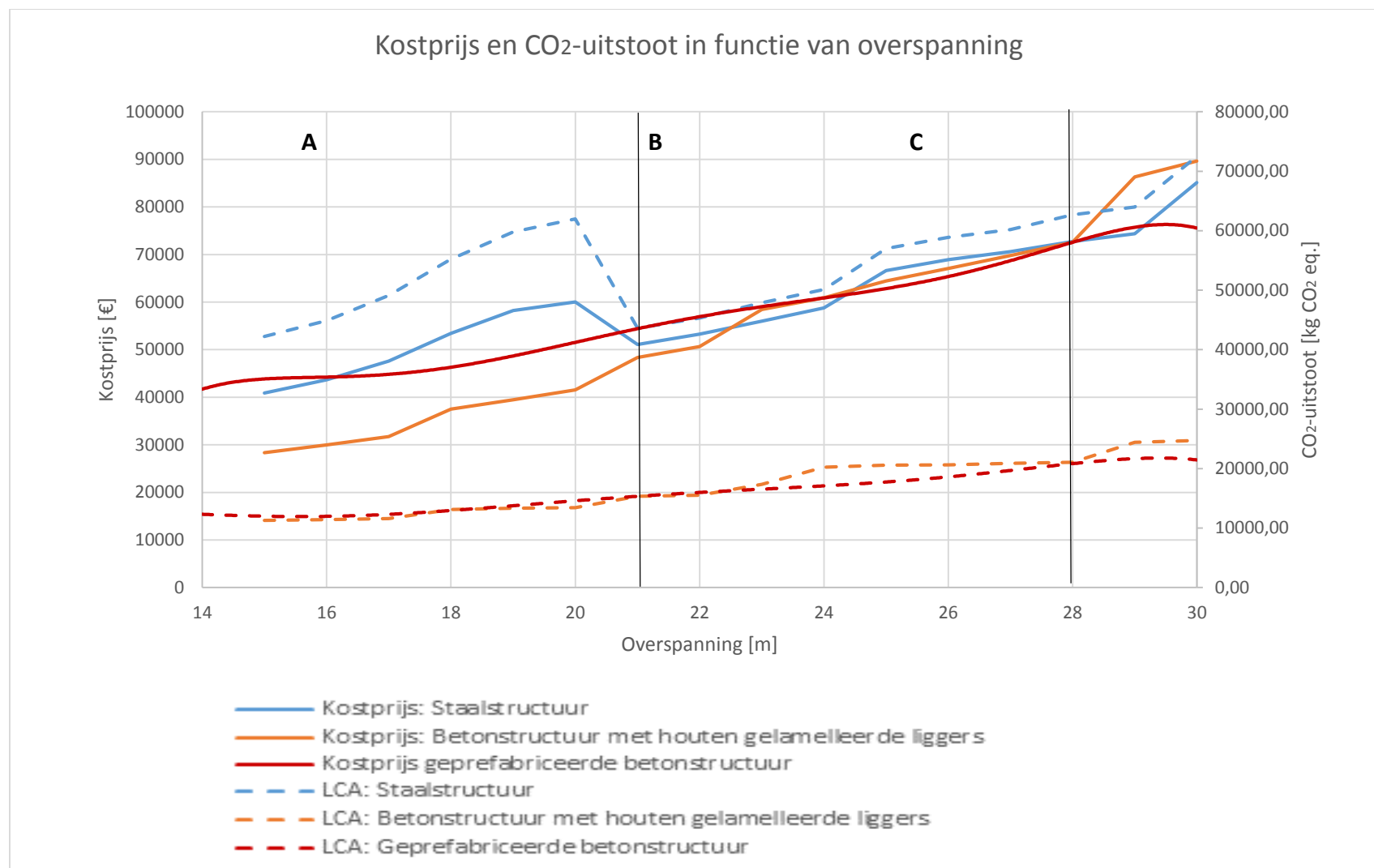


Bijlage 8: CO₂-uitstoot in functie van overspanning bij geprefabriceerde betonstructuur

Overspanning [m]	Gewicht secundair staal [kg]	Gewicht beton [kg]	Gewicht wapening [kg]	CO ₂ -uitstoot [kg CO ₂ eq.]
14	2239,23	80601,60	3204,98	15400,00
18	2420,83	85113,60	3274,03	16100,00
20	2521,31	97934,40	3935,74	18600,00
22	2627,11	102398,40	4039,31	19300,00
24	2737,50	117249,60	4758,56	22100,00
26	2851,87	121248,00	4879,39	22800,00
28	2969,70	139449,60	5788,52	26200,00
30	3090,53	143558,40	5846,06	26800,00



Bijlage 9: Kostprijs en milieu-impact in functie van overspanning



Auteursrechtelijke overeenkomst

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling:

Materiaaloptimalisatie bij industriehallen op basis van gecombineerde stabiliteits-, kostprijs- en milieubelastingsanalyses

Richting: **master in de industriële wetenschappen: bouwkunde**

Jaar: **2015**

in alle mogelijke mediaformaten, - bestaande en in de toekomst te ontwikkelen - , aan de Universiteit Hasselt.

Niet tegenstaand deze toekenning van het auteursrecht aan de Universiteit Hasselt behoud ik als auteur het recht om de eindverhandeling, - in zijn geheel of gedeeltelijk -, vrij te reproduceren, (her)publiceren of distribueren zonder de toelating te moeten verkrijgen van de Universiteit Hasselt.

Ik bevestig dat de eindverhandeling mijn origineel werk is, en dat ik het recht heb om de rechten te verlenen die in deze overeenkomst worden beschreven. Ik verklaar tevens dat de eindverhandeling, naar mijn weten, het auteursrecht van anderen niet overtreedt.

Ik verklaar tevens dat ik voor het materiaal in de eindverhandeling dat beschermd wordt door het auteursrecht, de nodige toelatingen heb verkregen zodat ik deze ook aan de Universiteit Hasselt kan overdragen en dat dit duidelijk in de tekst en inhoud van de eindverhandeling werd genotificeerd.

Universiteit Hasselt zal mij als auteur(s) van de eindverhandeling identificeren en zal geen wijzigingen aanbrengen aan de eindverhandeling, uitgezonderd deze toegelaten door deze overeenkomst.

Voor akkoord,

Breemans, Jonas

Van Asbroeck, Wouter

Datum: **31/05/2015**