



Industriehal ontwerpen

Hoe ziet het meest geschikte en kostenefficiënte ontwerp van de stalen bovenbouwconstructie eruit voor de industriehal van een firma te Hulst, met inachtneming van randvoorwaarden en geldende eisen?

Datum:	17 juni 2022
Auteur:	Wullems, M. (Mick)
Studentnummer:	00078059
Onderwijsinstelling:	HZ University of Applied Sciences
Opleiding:	Civiele Techniek (Nederlands)
Bedrijf:	IZV Roofing & Cladding, IBS Staalbouw
Afstudeeropdracht:	Staalconstructie ontwerpen, berekeningen & tekenen
Plaats van uitgave:	Hulst
Studiejaar:	2021-2022

Titel & ondertitel*Industriehal ontwerpen*

Hoe ziet het meest geschikte en kostenefficiënte ontwerp van de stalen bovenbouwconstructie eruit voor de industriehal van een firma te Hulst, met inachtneming van randvoorwaarden en geldende eisen?

Auteur	Mick Wullems (CT-NL) – 00078059
E-mailadres	wull0006@hz.nl
Onderwijsinstelling	HZ University of Applied Sciences
Opleiding	Civiele Techniek
Studiejaar	4
Semester	8
Stagebegeleider	Sjaak Sturm
Afstudeerdocent	Joachim de Keijzer
Stageduur	februari, 2022 – juli, 2022
Plaats van uitgave	Middelburg
Datum	17 juni 2022
Versie	1.0

Voorwoord

Dit rapport is geschreven als eindschrijft voor de bachelor *Civiele Techniek* aan de HZ University of Applied Sciences in Middelburg. De berekeningen en tekeningen zijn uitgevoerd in samenwerking met *IZV Roofing & Cladding* en *IBS Staalbouw* in Kloosterzande.

Vanaf februari 2022 tot juli 2022 heb ik met veel plezier gewerkt aan dit rapport over constructieberekeningen en constructietekeningen van een industriehal in staal. Gedurende het uitwerken van de schrijft kwam ik erachter dat het ontwerpen van een constructie naar een zeer breed geheel getrokken kan worden. Hierdoor zitten veel verschillende onderdelen in dit rapport, waaronder ook theoretisch vooronderzoek dat nodig is voor het maken van de constructieberekeningen. Dit was een leuke uitdaging, omdat ik ook aspecten ben tegengekomen die niet vergelijkbaar zijn met het studieprogramma van de opleiding. Ook nieuwe software, zoals Diamonds BuildSoft en Tekla Structures, heb ik onder andere leren gebruiken. Tevens biedt deze afstudeerstage mij de mogelijkheid om het werk van constructeur van dichtbij mee te maken.

Graag zou ik de medewerkers van *IZV Roofing & Cladding* en *IBS Staalbouw* en de volledige afstudeercommissie willen bedanken voor hun begeleiding en betrokkenheid tijdens het maken van deze eindschrijft. Allereerst wil ik constructeur Sjaak Sturm bedanken voor het opzetten van deze afstudeeropdracht, zijn ondersteuning bij het opzetten van de constructieberekeningen, het beschikbaar stellen van licenties, brochures, (tabellen)boeken, handleidingen, het wegwijs maken binnen het bedrijf en zijn kritische houding ten opzichte van het academisch niveau van mijn onderzoek. Als tweede wil ik tekenaars Arjen Seghers en Wilko de Booij bedanken voor hun ondersteuning bij het opzetten van de overzichtstekeningen. Als derde wil ik directeur Bob Compier bedanken voor het opzetten van de calculatie voor mijn variantenstudie. Als laatste wil ik afstudeerdocent Joachim de Keijzer bedanken voor zijn uitgebreide en duidelijke feedback op alle voortgang.

Tot slot wil ik *IZV Roofing & Cladding* en *IBS Staalbouw* in het algemeen bedanken voor het beschikbaar stellen van hun faciliteiten en het vrijmaken van tijd om mij te ondersteunen, zowel tijdens het voortraject als tijdens het begeleidingstraject en de voltooiingsfase. Ook alle collega's van IZV en IBS bedankt voor de gezellige werksfeer en leerzame gesprekken.

Ik wens u veel leesplezier toe.

Samenvatting

Een firma in de installatietechniek wil in 2023 een nieuwe locatie openen in de vorm van een industriehal op het bedrijventerrein van Hulst. De firma heeft aan *IZV Roofing & Cladding* en *IBS Staalbouw* te Kloosterzande de opdracht gegeven een scherp geprijsde opzet te maken van de stalen bovenbouwconstructie. Om dit goed vast te kunnen stellen en aantoonbaar/inzichtelijk te krijgen, wil de firma dat er (bij voorkeur) drie verschillende overspanningsconstructies worden geanalyseerd. In dit rapport staat de volgende onderzoeksvraag dan ook centraal: *‘Hoe ziet het meest geschikte en kostenefficiënte ontwerp van de stalen bovenbouwconstructie eruit voor de industriehal van een firma te Hulst, met inachtneming van randvoorwaarden en geldende eisen?’*.

Het belangrijkste doel van dit eindwerk is het ontwerpen van de stalen bovenbouwconstructie door middel van constructieberekeningen die worden ondersteund met overzichtstekeningen van het eindontwerp. De beantwoording van deze onderzoeksvraag begint bij het maken van een stramienplan; de basis van het eindontwerp. Waar het voornamelijk om gaat: ervoor zorgen dat de afstanden tussen het staalwerk afgestemd zijn op de sterkte van de dak- en gevelplaten. Wat leidend kan zijn in een stramienplan zijn het funderingsplan en het basisontwerp van een architect. In deze situatie is echter nog niets vastgesteld met betrekking tot een funderingsplan. Sneeuwbelasting, windbelasting, regenwater in de vorm van accumulaties, zonnepanelen, buitenafwerking en isolatie van het dak steunen af op de onderliggende geprofileerde dakplaat. Hoe groter deze belastingen, des te kleiner worden de maximaal te overspannen afstanden. In de basis geldt hetzelfde voor de gevels; hoe groter de winddruk of -zuiging, des te kleiner worden de maximaal te overspannen afstanden.

In dit geval is in samenspraak met de opdrachtgever gekozen voor een plat warmdak met een binnendoosysteem. Dakconstructies zijn opgebouwd uit dakdichting, draagconstructie, isolatiemateriaal en dampscherm en kunnen in verschillende manieren worden opgebouwd. Er zijn verschillende daktypen te onderscheiden, namelijk warmdak, omgekeerd dak en kouddak, al dan niet plat, met een helling of met een toeg. Een warmdak is als volgt samen te vatten: dakdichting met geprofileerde staalplaat, isolatiemateriaal, dampscherm en draagconstructie. Naast een binnendoosysteem bestaan ook sandwichpanelen. Sandwichpanelen zijn opgebouwd uit een stalen buitenplaat, een isolatiekern van hard polyisocyanuraatschuim (PIR) of hard polyurethaanschuim (PUR) en een stalen binnenplaat. Bij een binnendoosysteem wordt isolatiemateriaal in de geprofileerde platen gebracht, waarbij de buitenkant kan worden afgewerkt met verschillende zetvormen. Door de grote keuzevrijheid en de betere prestaties op het gebied van brandwerendheid is gekozen voor een binnendoosysteem met glaswolisolatie. In het warmdak worden drukvaste PIR-panelen gebruikt, vanwege het lichte gewicht en de goede isolatiewaarden.

De opbouw van het dak en de gevels maken het met een SAB B140/600 mogelijk om overspanningen te maken van 6,25 m. De opdrachtgever heeft aangegeven een werkplaats te willen met een lengte van 50,00 m en een breedte van 35,00 m, inclusief de ruimte voor het kantoor, kantine, toiletten, stookruimte en testruimte. De opslagplaats behoort eveneens een lengte te hebben van 50,00 m en een breedte van 18,00 m. De portalen, waar de industriehal hoofdzakelijk uit is opgebouwd, kunnen,

zoals blijkt, op een onderlinge afstand van 6,25 m worden toegepast. In de kopgevels worden dezelfde binnendoosprofielen toegepast als binnenplaat. Er is hier gekozen voor zes stramienafstanden van 5,83 m (35,00 m in totaal voor de breedte van de werkplaats) en vier stramienafstand van 4,50 m (18,00 m in totaal voor de breedte van de opslagplaats). Zo is het hele stramienplan tot stand gekomen.

De afstand tussen het staal van de portalen bepaalt de grootte van de belastingen op de overspannende constructie. De opdrachtgever heeft aangegeven op termijn zonnepanelen te willen installeren, dus dat betekent dat de staalconstructie – naast het eigengewicht – wordt belast met het gewicht van de dak- of gevelconstructie, de zonnepanelen, windbelasting of sneeuwbelasting. Deze worden verwerkt in de rekenmodellen in Diamonds BuildSoft. De zonnepanelen worden niet direct na de afwerking van het dak aangebracht, dat maakt het belangrijk om een situatie zonder zonnepanelen te beschouwen. De volgende variaties zijn te maken: windbelasting mét zonnepanelen, windbelasting zonder zonnepanelen en sneeuwbelasting mét zonnepanelen.

Dit is de eerste keer dat ik constructiedelen doorreken door middel van Diamonds BuildSoft rekensoftware. BuildSoft beschikt over veel geautomatiseerde functies, wat tijd bespaard, maar dat verbergt een belangrijk deel van het onderzoeksproces. Voor de betrouwbaarheid van de resultaten worden handberekeningen gemaakt om de resultaten definitief te kunnen vaststellen. Dit is lang niet voor alle constructiedelen gedaan; na verloop van tijd is voldoende tijd besteed aan de werking van BuildSoft dat de kwaliteit van de rekenmodellen goed genoeg is om daarop verder te gaan. In dit eindwerk worden de volgende constructiedelen doorgerekend: één portaal in het midden van de industriehal, één kopgevel, alle windverbanden, één kolomvoetplaatverbinding, een selectie van bout- en lasverbindingen. Het portaal bestaat uit drie kolommen en twee liggers. De grootste ligger overspant 35,00 m en wordt toegepast in drie varianten.

In de eerste variant wordt een vakwerkligger toegepast. Vakwerkliggers bestaan in velen soorten en maten, maar de vraag is welk ontwerp het beste geschikt is. Aan de hand van vuistregels uit de literatuur is de hoogte vastgesteld. Verder is de soort bepaald met een eenvoudige redenering en een voorselectie bestaande uit drie typen vakwerkliggers: Warren (W-ligger), Pratt (N-ligger) en Howe (N-ligger). De definitieve vakwerkligger bestaat uit 12 velden, waarbij de diagonalen en verticalen bestaan uit SHS-kokerprofielen en de randstaven bestaan uit HEA-profielen. Uit de toetsingen blijkt dat deze vakwerkligger minder ver doorbuigt dan een raatligger of plaatligger. Verder dient de vakwerkligger op zeven verschillende punten langs de overspanning te worden gesteund om het uitknikken van de onderrandstaaf te voorkomen. De uiteinden van de bovenrandstaaf worden scharnierend verbonden met een boutverbinding in de flenzen van de kolomprofielen. In het midden kan de vakwerkligger worden gesplitst met een boutverbinding in de randstaven; dat maakt de ligger makkelijk te transporteren.

In de tweede variant wordt een raatligger toegepast. Door verschillende profielen te proberen is het eenvoudig te bepalen wat de bottelnek is voor dit typen liggers in deze situatie. Is de doorbuiging bepalend of wellicht toch de kipstabiliteit? Om de vergelijking met de vakwerkligger eerlijk te laten

verlopen wordt hetzelfde aantal kipsteunen toegepast bij deze raatligger. Dan blijkt dat de raatligger in eerste instantie meer kipsteunen nodig heeft, dus de onderflens moet uit zichzelf meer weerstand bieden tegen het uitknikken. Uit de berekeningen blijkt dat de doorsnede van de definitieve raatligger bestaat uit een HEA 900 vermaakt tot een standaardraatligger (dus anderhalf maal de hoogte van het standaardprofiel), waarbij aan de onderflens een UNP 400 om de sterke as wordt vastgelast. Om de lengte van de raatligger transporteerbaar te maken wordt het midden gesplitst en zal daar een momentvastboutverbinding gemaakt moeten worden. Deze boutverbinding wordt gezien als detail en zal alleen worden gedimensioneerd als blijkt dat deze variant de winnende variant is in de multicriteria-analyse (MCA).

De derde variant betreft een plaatligger. In de basis is een plaatligger vergelijkbaar met een IPE-profiel, maar dan groter. Op deze manier is het uiteindelijke profiel ook samengesteld. Om het productieproces van deze plaatliggers praktisch te houden, wordt zo veel mogelijk gebruik gemaakt van staalstrip- pen en staalplaten die bij vrijwel alle groothandels in staal verkrijgbaar zijn. Ook de plaatligger moet met evenveel kipsteunen stabiel worden. De definitieve doorsnede van de plaatligger bestaat uit 300x30 strippen als flenzen en 1200x8 staalplaten als lijf. Aan de onderflens wordt eveneens een UNP 400 om de sterke as vastgelast. Om de lengte van de plaatligger transporteerbaar te maken wordt het midden gesplitst en zal daar een momentvastboutverbinding gemaakt moeten worden, mits deze variant de winnende variant is in de MCA.

Hieronder vindt u een kort overzicht van de MCA. Een score van -2 is de laagste score die aan een criterium kan worden toegekend en staat synoniem voor 'zeer slecht'. Een score van +2 is de hoogste score die aan een criterium kan worden toegekend en staat synoniem voor 'zeer goed'.

	Wegingsfactor	Vakwerkligger	Raatligger	Plaatligger
<i>Materiaalkosten</i>	50%	+2	-2	-1
<i>Productiekosten</i>	15%	+1	0	+2
<i>Conservering</i>	5%	-2	-1	-2
<i>Transportkosten</i>	15%	-1	-1	+1
<i>Montage</i>	5%	+1	-1	-1
<i>Veerkrachtigheid, flexibiliteit en vormgeving</i>	10%	+1	+2	-2
Eindscore	100%	+1,80	-1,05	-0,40

De eerste variant, de vakwerkligger, heeft de hoogste score behaald in de MCA. Deze hoge score valt met name toe te kennen aan het feit dat een relatief geringe hoeveelheid staal benodigd is, waardoor de materiaalkosten fors lager liggen. Bovendien is de doorbuiging van de vakwerkligger het laagste van alle liggers, waardoor het aanbrengen van een zeeg niet noodzakelijk is. Om aan het minimale dakafschot te kunnen voldoen kan de hoogte van de vakwerkligger worden vergroot om de doorbuiging te compenseren. Dit is eenvoudiger dan zegen. Verder is een vakwerkligger een 'open' staalconstructie

met voldoende opties om kabels en leidingen doorheen te leggen, dus praktisch, flexibel en veerkrachtig. Ook qua vormgeving zijn vakwerkliggers de absolute favoriet. Hetzelfde geldt voor raatliggers, maar dit geldt minder voor plaatliggers. Met deze uitkomst is een groot deel van de onderzoeksvraag van dit eindwerk beantwoord, maar om tot een onomstotelijke en definitieve beantwoording te komen zijn ook de kolommen en windverbanden berekend.

Te beginnen met de kolommen. De buitenkolommen worden belast op druk en buiging vanwege windinvloeden. In een situatie met sneeuw wordt een kolom alleen belast met drukkrachten, maar daarvan blijkt dat dit niet de maatgevende situatie is. Omdat druk en buiging tegelijkertijd optreden in de kolomdoorsnede moet worden getoetst op een combinatie van kip- en knikstabiliteit. Ook de middenkolom van het portaal kan worden belast op winddruk, ondanks dat deze rij kolommen zich binnen bevindt. Tussen de middenkolommen wordt een scheidingswand aangebracht met een overheaddeur. Bij openstaande overhadduren waait wind naar binnen en drukt tegen de scheidingswand. Ook dit is meegenomen in de rekenmodellen. Alle kolommen van het portaal bestaan uit een HEA 280.

Windverbanden, zoals windliggers en windbokken, kunnen in verschillende configuraties worden aangebracht. De vraag is alleen: welke configuratie is slim en efficiënt? Er is in overleg met de opdrachtgever afgesproken om te kiezen voor een vierzijdig geschoorde constructie, wat betekent dat alle gevels worden voorzien van windbokken. In het definitieve ontwerp worden vier windliggers in het dakvlak gebracht, dus twee windliggers per windrichting. Verder worden in totaal tien windbokken aangebracht, dus twee per gevel en twee in de scheidingswand tussen de werkplaats en de opslaghal. De windbokken bestrijken twee stramienafstanden, zodat de grootte van de trekkrachten beperkt blijven. Dit levert een belangrijk voordeel op voor de ankers van de kolomvoetplaatverbinding en de onderliggende funderingselementen.

Aan de hand van dit onderzoek kan men het volgende concluderen met betrekking tot de onderzoeksvraag: *'Hoe ziet het meest geschikte en kostenefficiënte ontwerp van de stalen bovenbouwconstructie eruit voor de industriehal van een firma te Hulst, met inachtneming van randvoorwaarden en geldende eisen?'*. Het meest geschikte en kostenefficiënte ontwerp van de bovenbouwconstructie bestaat uit een 12-velden-vakwerkligger waarin de diagonalen worden belast met een trekkrachten. Het fabricageproces van een vakwerkligger is zeer arbeidsintensief; in ieder geval veel arbeidsintensiever dan de fabricage van een raatligger of plaatligger. Echter is het aantal kilo's staal zo laag, dat de vakwerkligger toch de meest kostenefficiënte optie is. De vakwerkligger bestaat uit een HEA 220 (S235) als bovenrandstaaf, een HEA 140 (S235) als onderrandstaaf, een SHS 70x70x5 (S275) voor de diagonalen en een SHS 70x70x4 (S275) voor de verticalen. Met de gedachte dat extra bewerkingen weer extra geld kosten is ervoor gekozen om een standaard IPE 550 (S235) profiel te gebruiken om de opslaghal te overspannen. Het alternatief zou een raatligger kunnen zijn.

De kolommen bestaan uit HEA 280 (S235) profielen, maar ter plaatse van de windbokken worden zwaardere HEA 320 (S355) profielen gebruikt. Deze kolommen worden extra belast op druk vanuit de windbok bij de afdracht van windbelastingen. Verder worden meerdere windliggers toegepast, zodat

de horizontale windkrachten worden verdeeld over de windliggers en zo de drukkracht in de bovenrandstaven van de vakwerkligger beperkt genoeg zijn om een HEA 220 (S235) als bovenrandstaaf te behouden.

Als laatste worden overzichtstekeningen geproduceerd door middel van Tekla Structures. Bij het maken van het 3D-model blijkt dat de diagonalen en verticalen kruizen. Om dit te voorkomen zijn de diagonalen een beetje opgeschoven. Hetzelfde is gedaan voor de windligger en windbokken waaruit de stabiliteit wordt verkregen; er zijn excentriciteiten nodig om een mooie aansluiting te vinden op de kolommen en ligger. Het is derhalve aan te bevelen een gedetailleerder 3D-rekenmodel te maken waarin deze details zijn meegenomen om de relaties tussen de verschillende constructiedelen beter te kunnen bepalen. Verder valt er ook een belangrijke aanbeveling te maken voor een calculatie van de gevelbekleding; bij een lagere ligger is minder materiaal nodig om de gevels op te bouwen, dus worden hier minder kosten gemaakt. Deze effecten, bij behoud van de vrije hoogte, zijn niet meegenomen in de calculatie, dus is het aan te bevelen om dit punt allereerst voor te leggen aan de opdrachtgever en, indien gewenst, een algehele calculatie uit te voeren. Ook moet, alvorens de staalconstructie wordt gerealiseerd, een funderingsplan worden opgesteld.

Inhoudsopgave

1. Inleiding.....	1
§ 1.1 Aanleiding.....	1
§ 1.2 Achtergrond.....	1
§ 1.3 Probleemstelling.....	3
§ 1.4 Onderzoekskader.....	4
§ 1.5 Onderzoeksdoelstelling.....	4
§ 1.6 Onderzoeksvraag.....	5
§ 1.7 Aanpak en leeswijzer.....	5
2. Methode.....	8
3. Theoretisch kader.....	11
§ 3.1 Uitgangspunten en randvoorwaarden.....	11
§ 3.1.1 Basisontwerp en randvoorwaarden.....	11
§ 3.1.2 Algemene uitgangspunten.....	13
§ 3.1.3 Bouwwerktype.....	13
§ 3.1.4 ψ -factoren voor gebouwen (per klasse).....	14
§ 3.1.5 Materiaaleigenschappen.....	14
§ 3.1.6 Belastingcombinaties.....	14
§ 3.2 Belastingen.....	14
§ 3.2.1 Windbelastingen.....	14
§ 3.2.2 Sneeuwbelastingen.....	15
§ 3.2.3 Wateraccumulaties.....	15
§ 3.2.4 Blijvende belastingen.....	16
4. Resultaten.....	17
§ 4.1 Analyse vakwerkligger.....	17
§ 4.1.1 Warren vakwerkligger (W-ligger/V-ligger).....	17
§ 4.1.2 Pratt vakwerkligger (N-ligger op trek).....	19
§ 4.1.3 Howe vakwerkligger (N-ligger op druk).....	20
§ 4.1.4 Gewichtsberekening.....	21
§ 4.1.5 Optimalisatieonderzoek Pratt vakwerkligger.....	22
§ 4.2 Analyse raatligger.....	27

§ 4.3 Analyse plaatligger	29
§ 4.4. Variantenstudie – Multicriteria-analyse (MCA)	31
§ 4.5 Analyse standaardligger opslaghal	36
§ 4.6 Kolommen	36
§ 4.6.1 Kolom A (linker buitenkolom)	37
§ 4.6.2 Kolom B (rechter buitenkolom)	38
§ 4.6.3 Kolom C (middenkolom)	39
§ 4.7 Windverbanden	40
§ 4.7.1 Windligger A en B met afdracht naar windbok A en B	42
§ 4.7.2 Windligger C en D met afdracht naar windbok C en D	45
§ 4.8 Kopgevels en tweede controle portaalkolommen	48
§ 4.8.1 Analyse kopgevels	48
§ 4.8.2 Tweede controle portaalkolommen	51
§ 4.9 Drukstaven	55
§ 4.9.1 Drukstaven in de langsgevels en scheidingswand	55
§ 4.9.2 Drukstaven in de kopgevels	55
§ 4.9.3 Drukstaven t.p.v. windligger A en de vakwerkligger	56
§ 4.9.4 Drukstaven t.p.v. windligger B en IPE550	56
§ 4.10 Bout- en lasverbindingen	57
5. Conclusie	58
6. Discussie & aanbeveling	64
Literatuurlijst	67

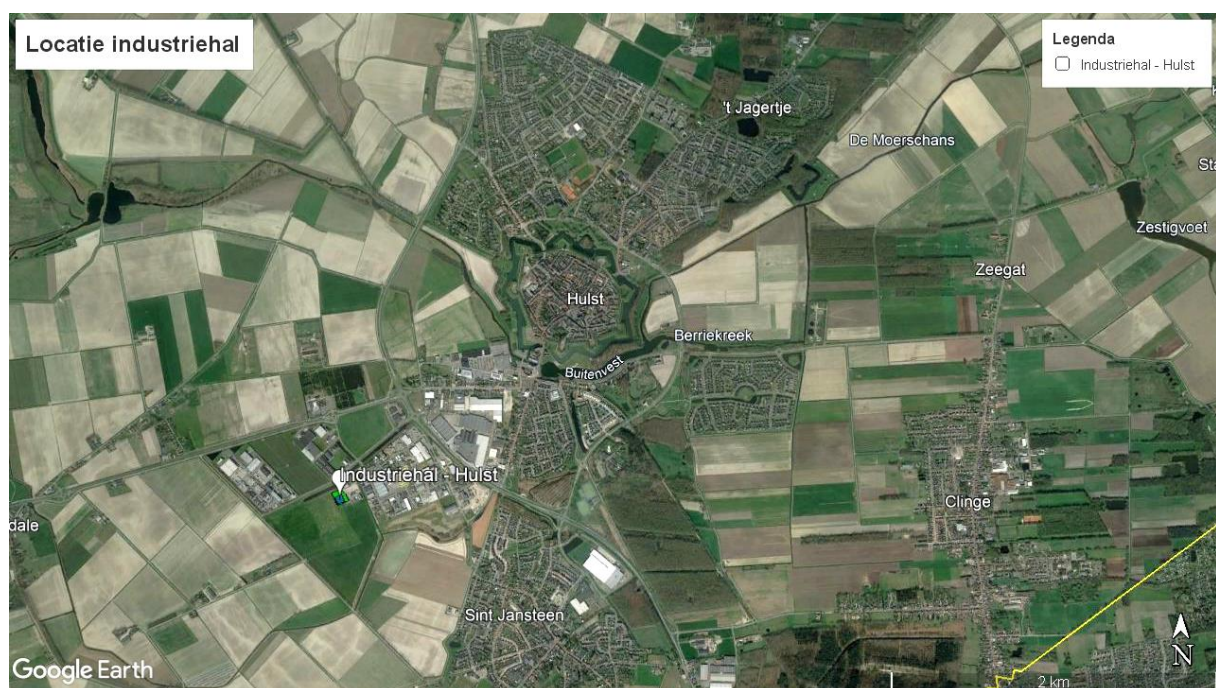
1. Inleiding

§ 1.1 Aanleiding

Een fictieve firma in de installatietechniek heeft vestigingen over het hele land en is van plan om in de toekomst een locatie te openen in Hulst. De firma heeft eerder gesproken met gemeente Hulst over hun plannen. Alle procedures zijn doorlopen en de firma heeft inmiddels een vergunning van de gemeente ontvangen. De firma streeft ernaar om de nieuwe industriehal met kantoor, werkplaats en opslagplaats in 2023 te openen. Voor de realisatie van de bovenbouwconstructie in staal heeft de firma gekozen voor lokale expertise op het gebied van staalbouw. Zo doende is de firma in contact gekomen met *IZV Roofing & Cladding* en *IBS Staalbouw* te Kloosterzande, voornamelijk vanwege de eigen productie van de constructiedelen en de relatief beperkte afstand van de projectlocatie. Dit is vooral gunstig voor duurzaamheid.

§ 1.2 Achtergrond

Het betreft een opdracht met een fictieve basis waarbij constructieberekeningen en constructietekeningen van een industriehal moeten worden gemaakt, zodat de constructiedelen van de stalen hoofd-draagconstructie na de zomerperiode in de productie kunnen. De opdrachtgever is een firma die graag een industriehal wilt laten realiseren - op het bedrijventerrein net buiten de binnenstad van Hulst - die kan worden gebruikt als opslaghal, werkplaats en testruimte. Op deze testruimte is het wenselijk dat er een kantoorruimte en een stookruimte wordt gesitueerd. Verleden week heeft gemeente Hulst een vergunning verstrekt voor de realisatie van de industriehal, waarbij een kavel is aangewezen met een breedte van circa 85,00 meter en een diepte (lengte) van circa 70,00 meter. De exacte locatie in Hulst is te zien in onderstaande figuren 1 en 2.

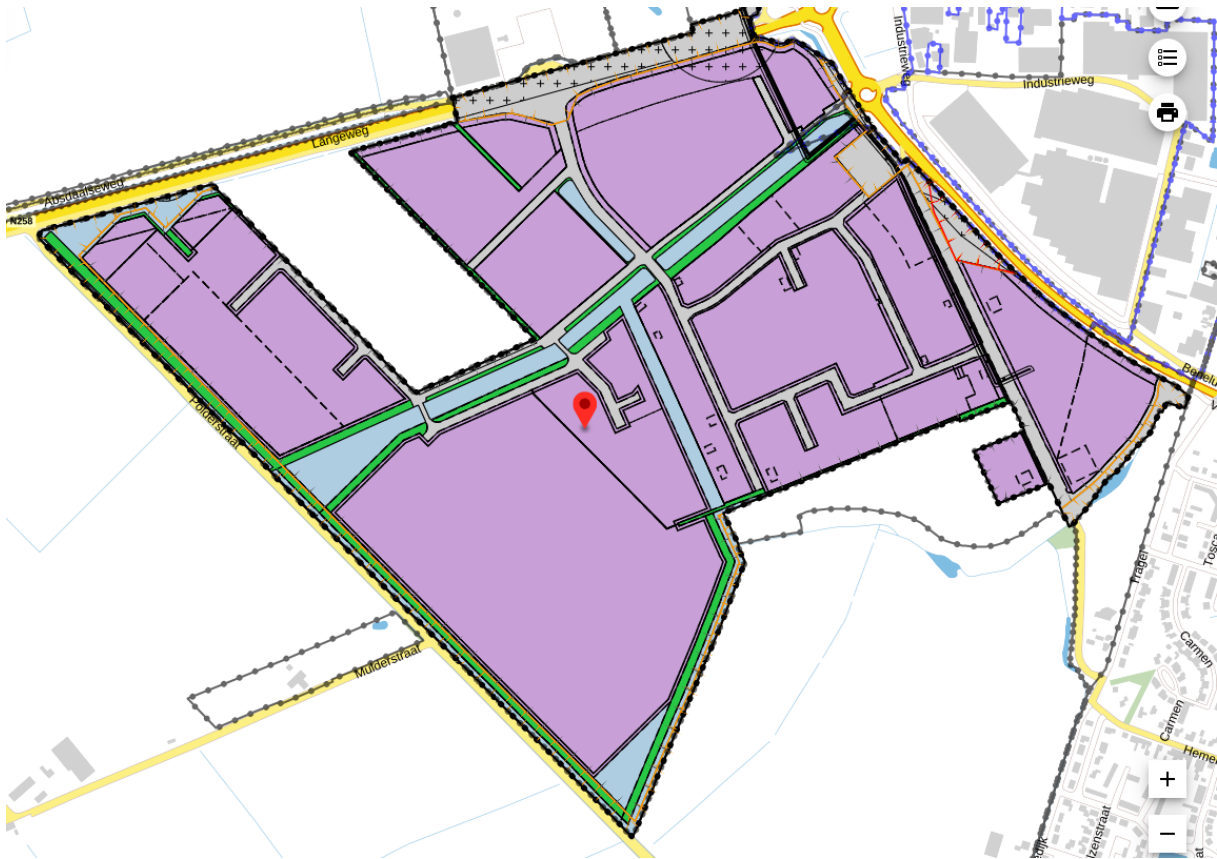


Figuur 1: Kavel waar de industriehal zal worden gerealiseerd is gelegen buiten de binnenstad van Hulst (Google Earth Pro, 2022).



Figuur 2: Kavel aan de rand van het bedrijventerrein waar de industriehal zal worden gerealiseerd (Google Earth Pro, 2022). In het groen het aangewezen kavel en in het blauw de beoogde industriehal.

In onderstaande figuur 3 is de kaart te zien van het bestemmingsplan van het bedrijventerrein in Hulst. De bestemmingsregels zijn zeer uitgebreid en bestaan uit artikelen, waarin regels staan aangegeven voor groen, tuin, verkeer, waterleidingen, gasleidingen, etc. In dit geval betreft het een bedrijventerrein-1, waarvoor specifieke bouwregels gelden en verschillende bedrijfsactiviteiten mogelijk zijn. Uit de omgevingsvergunning zijn geen specifieke regels af te leiden, dus er wordt niet in detail getreden op de toepassing van het bouwwerk in kwestie.



Figuur 3: Fragment uit het bestemmingsplan opgevraagd bij Ruimtelijkeplannen.nl.

In een bedrijventerrein-1 gebied zijn maximale bouwhoogten, minimaal bouwhoogten en bouwvlak ten opzichte van de weg voorgeschreven. Deze zijn te vinden in *Paragraaf 3.1 Uitgangspunten en randvoorwaarden*.

§ 1.3 Probleemstelling

De firma in kwestie beschikt tevens niet over voldoende kennis, ervaring en middelen om de delen van de bovenbouwconstructie te berekenen, te dimensioneren en te produceren. Daarnaast is bouwen zonder constructieberekening vaak illegaal. Het is in ieder geval illegaal om zonder constructieberekening te bouwen als je vergunningplichtig bent. Een constructieberekening is namelijk een verplicht onderdeel van de omgevingsvergunning. “Met name de veiligheidseisen in artikel 2.1 en 2.2 van het Bouwbesluit zijn erg belangrijk voor een constructie. De makkelijkste manier om de veiligheid te testen is dan ook door het laten maken van een constructieberekening” (De Lepper, 2022). Aan de hand van de constructieberekening controleert de gemeentelijk ambtenaar of de industriehal voldoet aan de veiligheidseisen (De Lepper, 2022).

Dit project gaat over staalconstructies, waarbij ik de taken vervul van de eerste constructeur. Het doel is het dimensioneren van de volledige staalconstructie aan de hand van constructieberekeningen. Op basis van verschillende varianten voor de liggerconstructie goede onderbouwing te geven met berekeningen en andere afwegingen. Het resultaat van de staalconstructie, in de vorm van deze eerste opzet, gaat vervolgens naar een tweede constructeur die de verdere ontbrekende details uitwerkt.

De staalprijzen zijn de afgelopen tijd explosief gestegen en inmiddels al ruim verdubbeld ten opzichte van medio 2020. Hiervoor zijn een aantal oorzaken aan te merken: de enorme gevolgen van Covid-19, de stijgende grondstofprijzen, stijgende brandstofprijzen en de algehele schaarste op de staalmarkt. De toenemende druk op efficiënte bouwmethoden om de materiaalkosten te beperken is daarmee des te belangrijker geworden.

§ 1.4 Onderzoekskader

De tweede groep constructeurs heeft laten weten dat zij minimaal de constructieberekeningen en de constructietekeningen willen zien van de kolommen, spanten die 35,00 m overspannen (al dan niet in een vakwerkligger, raatligger of plaatligger), windverbanden en voetplaten. Van tevoren moet ook al worden vastgesteld hoe de gevels worden bekleed voor de bepaling van het stramienplan. Verder moet ook al zijn vastgesteld of er vakwerkliggers, raatliggers of plaatliggers worden toegepast in de portalen van de industriehal. De komende tijd zullen deze constructiedelen worden gedimensioneerd met constructieberekeningen en het nodige tekenmateriaal.

Na de bepaling van het stramienplan kunnen de tekeningen en de criteria van de opdrachtgever worden verwerkt in een eerste tekening met alleen hartlijnen van de constructiedelen. Vervolgens worden de windbelastingen bepaald aan de hand van de norm. Door dit te combineren met andere permanente en variabele belastingen, zoals zonnepanelen, eigengewicht van de dak- en gevelbekleding en inspecties, kunnen de profielen van de bovenbouwconstructie worden bepaald met rekensoftware van Diamonds BuildSoft en eigen handberekeningen om aan te tonen dat de bevindingen juist zijn.

§ 1.5 Onderzoeksdoelstelling

Belangrijkste doelstellingen in dit eindwerk:

- › Aan de hand van de beschikbare gegevens een stramienplan maken als basis voor het staalontwerp.
- › Het bepalen van de belastingen en het construeren en dimensioneren van de (stalen) hoofddraagconstructie.
- › Een variantenstudie op de portalen toepassen die een overspanning van 35,00 meter mogelijk moet maken, waarbij gekeken wordt naar een vakwerkligger, raatligger en plaatligger.
- › De staalconstructie zo efficiënt mogelijk opbouwen om materiaalkosten te beperken.
- › Bij eventuele optredende problemen, ervoor zorgen dat met eenvoudige oplossingen de constructie wel voldoet.
- › Professionele constructietekeningen maken die de constructieberekeningen ondersteunen.

§ 1.6 Onderzoeksvraag

Het doel van dit project is het maken van een voorlopig ontwerp van de industriehal, zoals aangegeven door de firma in kwestie. De probleemstelling en de doelstelling leiden tot de volgende onderzoeksvraag: *Hoe ziet het meest geschikte en kostenefficiënte ontwerp van de stalen bovenbouwconstructie eruit voor de industriehal van een firma te Hulst, met inachtneming van randvoorwaarden en geldende eisen?*

Om deze onderzoeksvraag te kunnen beantwoorden moeten een aantal deelvragen worden beantwoord:

- › Wat zijn de voorwaarden bij het bepalen van het stramienplan?
- › Welke belastingen treden er op?
- › Welke overspanningsconstructie is constructief en kostentechnisch gezien het beste geschikt om de werkplaats te overspannen? En welke is het beste geschikt om de opslaghal te overspannen?
- › Hoe ziet de efficiëntere configuratie van windliggers en windbalken eruit?
- › Welke profielen zijn er nodig voor de kolommen, windverbanden en drukstaven?
- › Hoe zien de bout- en lasverbindingen van de industriehal eruit?
- › Wat zijn de benodigde afmetingen van de kolomvoetplaten?
- › Hoeveel kost de meest efficiënte ligger voor de overspanning van 35,00 m?
- › Welke toevoegingen en aanpassingen kan/moet ik doen om de constructie zo goed mogelijk op te bouwen?

§ 1.7 Aanpak en leeswijzer

Allereerst wordt de methode van het onderzoek opgesteld. Het project bestaat grofweg uit vijf delen. Het eerste deel is gefocust op het vaststellen van het definitieve ontwerp en de uitgangspunten en randvoorwaarden vanuit de opdrachtgever. Het tweede deel is gefocust op het bepalen van het stramienplan. Hier wordt met voor- en nadelen bepaald hoe het dak- en de gevels het beste kunnen worden opgebouwd. Verder worden de windbelastingen bepaald, zodat het staalprofiel van het dak- en gevelsysteem kan worden bepaald. Het derde deel richt zich op het vaststellen van belastingen voor de bovenbouwdraagconstructie. Dit wordt medebepaald door het stramienplan uit de derde deel. Het vierde deel richt zich op het maken van constructieberekeningen met handberekeningen en rekensoftware om de bovenbouwconstructiedelen te dimensioneren. In dit deel is een variantenstudie die aantoont hoe de liggers van de portalen zullen worden opgebouwd. In *Hoofdstuk 2 Methode* wordt verder toegelicht hoe de analyses worden uitgevoerd van de verschillende constructiedelen, welke stappen er worden genomen en welke gegevens en modellen er worden gebruikt.

In *Hoofdstuk 3 Theoretisch kader* zijn alle benodigde informatie én gegevens te vinden die nodig zijn bij het uitvoeren van de constructieberekeningen. In *Paragraaf 3.1 Uitgangspunten en randvoorwaarden* wordt een opsomming gegeven van alle uitgangspunten en randvoorwaarden met betrekking tot de industriehal. Hier zijn een vooraanzicht, zijaanzicht en 3D-zicht te vinden van het basisontwerp met de nodige beschrijving. Dit basisontwerp kan later veranderen als mocht blijken dat de stramienafstanden te groot zijn voor de overspanningen in het dak en de gevels. In dit hoofdstuk wordt ook gesproken

over de minimale vrije hoogte in de hal en de maximale te transporteren lengtes om de fabricage- en montagefase van de constructiedelen simpel te houden.

Daarna is een literatuurstudie verricht naar dak- en gevelsystemen. Dit is te lezen in *Bijlage D: Dak- en gevelsystemen* van het Bijlagenboek. Deze levert meer inzicht op het probleem waarbij een stramienplan moet worden gemaakt als beginpunt voor de constructieberekening van de industriehal. Deze achtergrondinformatie bestaat uit kennis over isolatiematerialen, geprofileerde platen en dak- en gevelsystemen. In *Bijlage B: Productblad ISOVER Cladipan 31* is alle informatie te vinden met betrekking tot dit isolatiemateriaal. Met deze onderbouwing kan het basisontwerp waar nodig worden aangepast. In *Bijlage D.7 Windbelasting volgens SAB-tabellen* worden de profielen van het binnendoosysteem gekozen aan de hand van windbelastingen die gegeven zijn bij de SAB-tabellen.

Vervolgens worden de belastingen bepaald voor wind, sneeuw en wateraccumulaties. In *Bijlagen E, F en G* van het Bijlagenboek zijn de precieze berekeningen voor deze belastingen met een samengevatte versie in *Paragraaf 3.2 Belastingen* van dit rapport. Tevens worden de blijvende belastingen als gevolg van de gekozen dak- en gevelconstructie bepaald, wat volledig terug te vinden is in *Bijlage H: Blijvende belastingen*. Voor de volledigheid en het aantonen van vaardigheden worden de windbelastingen eerst bepaald met handberekeningen en daarna vergeleken met de resultaten in Diamonds BuildSoft.

In *Bijlage I: Diamonds BuildSoft* is een algemene beschrijving gegeven van het proces om een rekenmodel op te zetten. Er wordt gekeken naar de invoer van structuren, belastingen, belastingcombinaties, kniklengtes berekenen, toetsing volgens de staalnorm en verdere optimalisaties. Deze benaderingswijze wordt toegepast voor de rekenmodellen van het vakwerk, de plaatligger en de raatligger.

In *Hoofdstuk 4 Resultaten* zijn globale beschrijvingen te vinden van analyses en constructieberekeningen, waarbij per constructiedeel de bevindingen worden gepresenteerd. In *Paragraaf 4.1 Analyse vakwerkligger* worden voorgeselecteerde vakwerkliggers geanalyseerd en worden de resultaten gepresenteerd, waarbij *Bijlage J: Vakwerkligger* aanvulling geeft met een algemene beschrijving en constructieberekeningen. Aan de hand van deze algemene beschrijving met achtergrond wordt een voorselectie gemaakt van drie vakwerkliggers. In *Paragraaf 4.2 Analyse raatligger* en *Paragraaf 4.3 Analyse plaatligger* worden de resultaten gepresenteerd uit de constructieberekeningen van de raatligger en de plaatligger, waarbij *Bijlage K: Raatligger* en *Bijlage L: Plaatligger* aanvulling geven met een algemene beschrijving en stapsgewijze constructieberekeningen. Om definitief vast te kunnen stellen welk type ligger het meest kostenefficiënt is, is een calculatie gemaakt. Omdat er ook een praktische kant aan de keuze zit, zoals bijvoorbeeld montage en fabricage, wordt gebruik gemaakt van een multicriteria-analyse (MCA). Dit is te zien in *Paragraaf 4.4 Variantenstudie - Multicriteria-analyse (MCA)*.

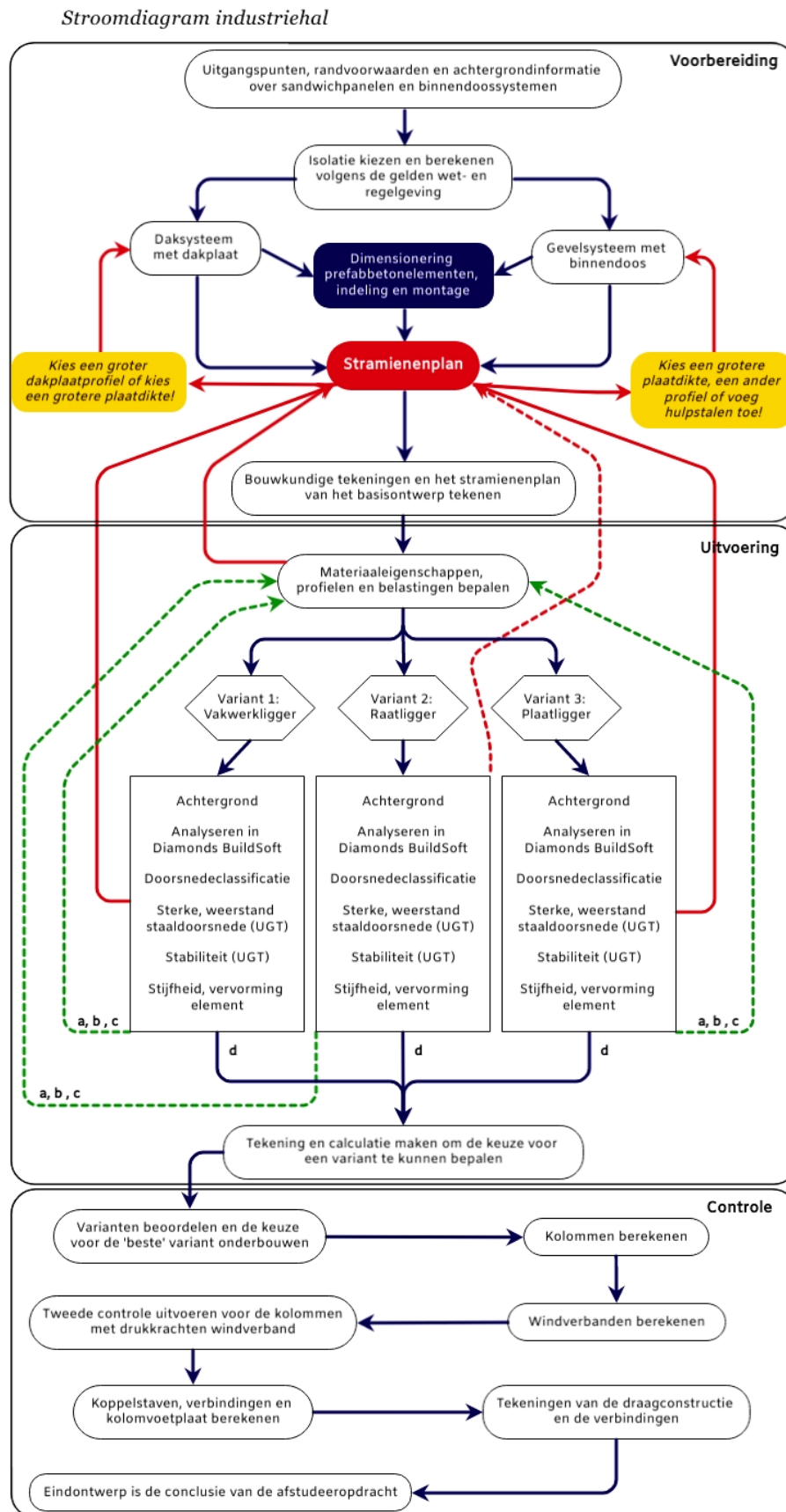
In *Paragraaf 4.5 Analyse standaardligger opslaghal*, *Paragraaf 4.6 Kolommen*, *Paragraaf 4.7 Windverbanden*, *Paragraaf 4.8 Kopgevels en tweede controle portaalkolommen* en *Paragraaf 4.9 Drukstaven* worden de overige delen van de hoofd draagconstructie berekend. Omdat in deze fase van het project veel meer duidelijk is geworden over de werking van Diamonds BuildSoft, is hier meer gebruik gemaakt

van computerberekeningen om het overzicht te bewaren. Als laatste worden enkele bout- en lasverbindingen gedimensioneerd in *Paragraaf 4.10 Bout- en lasverbindingen*.

In *Hoofdstuk 5 Conclusie* worden de belangrijkste bevindingen uit het project samengevat en wordt antwoord gegeven op de onderzoeksvraag.

In *Hoofdstuk 6 Discussie & aanbeveling*, ten slotte, wordt kritische gekeken naar het eindresultaat en worden aanbevelingen gegeven voor vervolgonderzoeken en eventuele verdere verdiepingen van dit onderzoeksproces. Verder zijn alle bijlagen te vinden in het bijgeleverde Bijlagenboek.

2. Methode



Made with VISME

Toelichting bij het stroomdiagram:

Het stramienenplan is een bepalende schakel in dit eindwerk en moet worden bepaald voor de dakplaten en de gevelplaten. Sneeuw, windbelasting, regenwater, zonnepanelen, buitenafwerking en isolatie van het dak steunen af op de onderliggende geprofileerde dakplaat. De overspanning van deze platen is niet ongelimiteerd en moet dus worden afgestemd op de afstand tussen de stalen van de hoofdportalen. Een grotere afstand tussen de hoofdportalen betekent dat er zwaardere en grotere geprofileerde dakplaten moeten worden toegepast, waardoor minder hoogte overblijft voor bijvoorbeeld een vakwerkconstructie. Ook zal dit betekenen dat er meer belasting komt te rusten op ieder portaal, waardoor weliswaar minder staalprofielen moeten worden toegepast, maar wel zwaardere staalprofielen en funderingselementen.

Nadat de stramienafstanden zijn bepaald aan de hand van het dak, wordt diezelfde afstand pas bepaald aan de hand van de gevels. Anders dan bij het dak, kunnen in de gevels hulpstalen worden aangebracht, waardoor de stramienafstand geen probleem meer hoeft te zijn. In het dak zijn in zeker zin ook hulpstalen aan te brengen in de vorm van gordingen, maar dan verandert het ontwerp van het dak drastisch. De dikte van de isolatie bepaalt het type binnendoossysteem dat kan worden toegepast en daarmee dus ook de overspanning die de profielen van het desbetreffende binnendoos kunnen maken. De invloed van winddruk en windzuiging is niet overal op de gevels hetzelfde, dus de plaatdikte moet hierop worden aangepast. Zoals eerder aangegeven zijn hulpstalen een andere optie, waardoor de overspanning halveert, maar dat betekent wel dat er weer extra kilo's staal moeten worden toegevoegd met de nodige fundering en verankering in de grond. Kort samengevat, ook de gevel bepaalt de afstand tussen de portalen en dus het stramienenplan, maar het dak is daarin het meest bepalend.

In totaal worden drie varianten geanalyseerd met Diamonds BuildSoft. Met de resultaten die daaruit voortkomen worden toetsingen gedaan voor sterkte, knikstabiliteit, kipstabiliteit, doorbuiging en plooi. Door de grote keuzevrijheid bij de vakwerkligger is een voorselectie toegepast, waaruit drie soorten vakwerkliggers zijn gekozen om verder te analyseren. Door deze vakwerkliggers verder te optimaliseren kan eenvoudig worden vergeleken welke optie het beste geschikt is om definitief te worden toegepast. Om oneerlijke vergelijkingen te voorkomen zijn een aantal uitgangspunten vastgesteld voor bijvoorbeeld het aantal velden, de staalkwaliteit, de vakwerkhoogte en de profieltypen. Om materiaalkosten te verlagen wordt de vakwerkligger met het laagste gewicht gekozen om verder in detail te worden geoptimaliseerd. Eventueel kan er worden gekozen voor een (a) andere hoogte van de vakwerkligger, (b) andere profieltypen en (c) andere staalsoort. Dit is in het stroomdiagram aangegeven als groen gestippelde terugkoppelingen naar het begin van de desbetreffende variant.

Er zijn verschillen manieren om een constructie geschikt of ongeschikt te verklaren. Zo kan deze keuze bepaald worden door de materiaalkosten, maar ook de kosten die gemoeid zijn met bijvoorbeeld fabricage, montage en afwerking. Ook hoeft het lang niet altijd te gaan om kosten, een constructie moet vooral ook maakbaar en handelbaar zijn. Dit komt terug in de variantenstudie en resulteert in één overspanningsconstructie die zal worden toegepast in alle acht portalen van de industriehal.

Op het moment dat de definitieve variant is vastgesteld kunnen de windverbanden, drukstaven en bout- en lasverbindingen worden berekend. Nadat alle delen van de constructie zijn berekend kunnen de tekeningen worden opgezet. In werkelijkheid zal hiermee eerder worden begonnen dan in het stroomdiagram staat aangegeven. Hetzelfde geldt voor de kostencalculatie voor de verschillende overspanningsconstructie die centraal staan in dit eindwerk. Op dit punt wordt namelijk het belangrijkste verschil gemaakt tussen efficiënt en inefficiënt. Met de afronding hiervan zijn alle doelstellingen van dit eindwerk doorlopen.

3. Theoretisch kader

§ 3.1 Uitgangspunten en randvoorwaarden

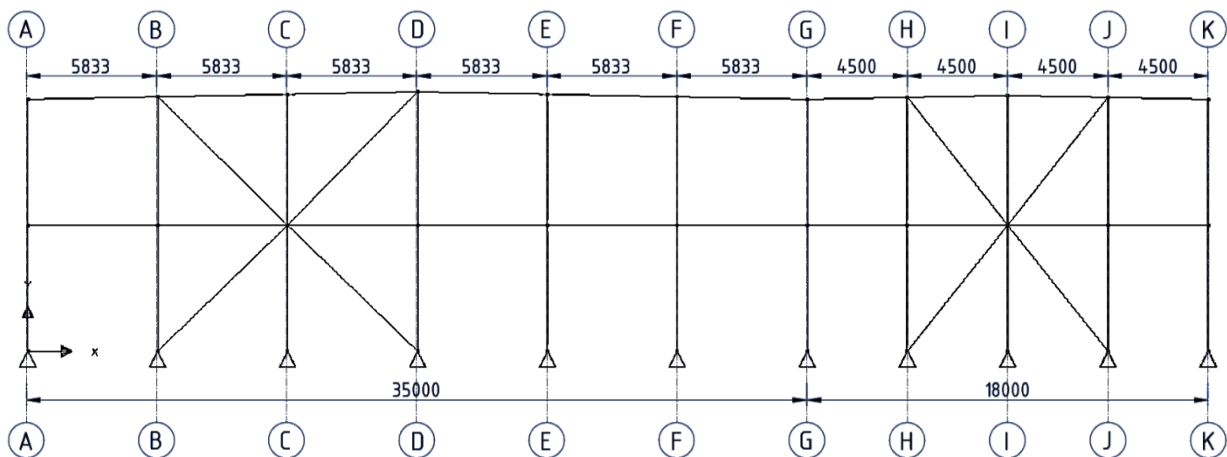
Voor het bepalen en uitwerken van het constructieve ontwerp, dienen een aantal uitgangspunten en randvoorwaarden in acht te worden genomen. Deze uitgangspunten komen voort uit wensen van de opdrachtgever, wettelijke vereisten en/of project specifieke omstandigheden.

§ 3.1.1 Basisontwerp en randvoorwaarden

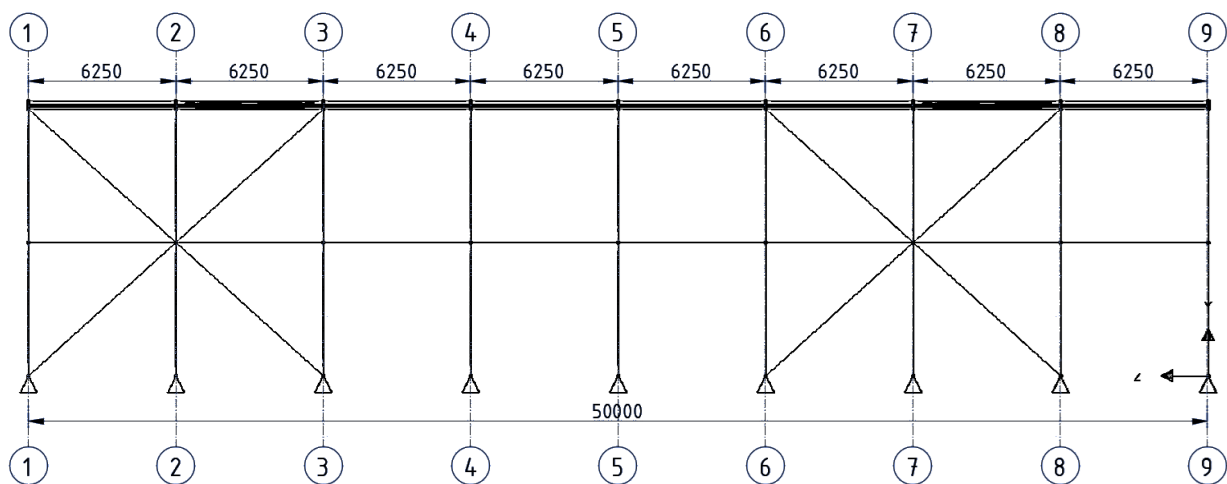
Maximale bouwhoogte bestemming	: 16,00 m
Minimale bouwhoogte bestemming	: 6,00 m
Aangenomen bouwhoogte	: 12,00 m
Minimale vrije hoogte werkplaats	: 9,00 m
Minimale vrije hoogte opslag	: 10,20 m
Dakafschot:	: 20,00 mm/m
Minimale opgegeven breedte	: 53,00 m
	In 6 stramiensegmenten van 5,83 m en 4 stramiensegmenten van 4,50 m
Minimale opgegeven lengte	: 50,00 m
	In 8 stramiensegmenten van 6,25 m (Zie onderstaande figuren 4 en 5)

Verder:

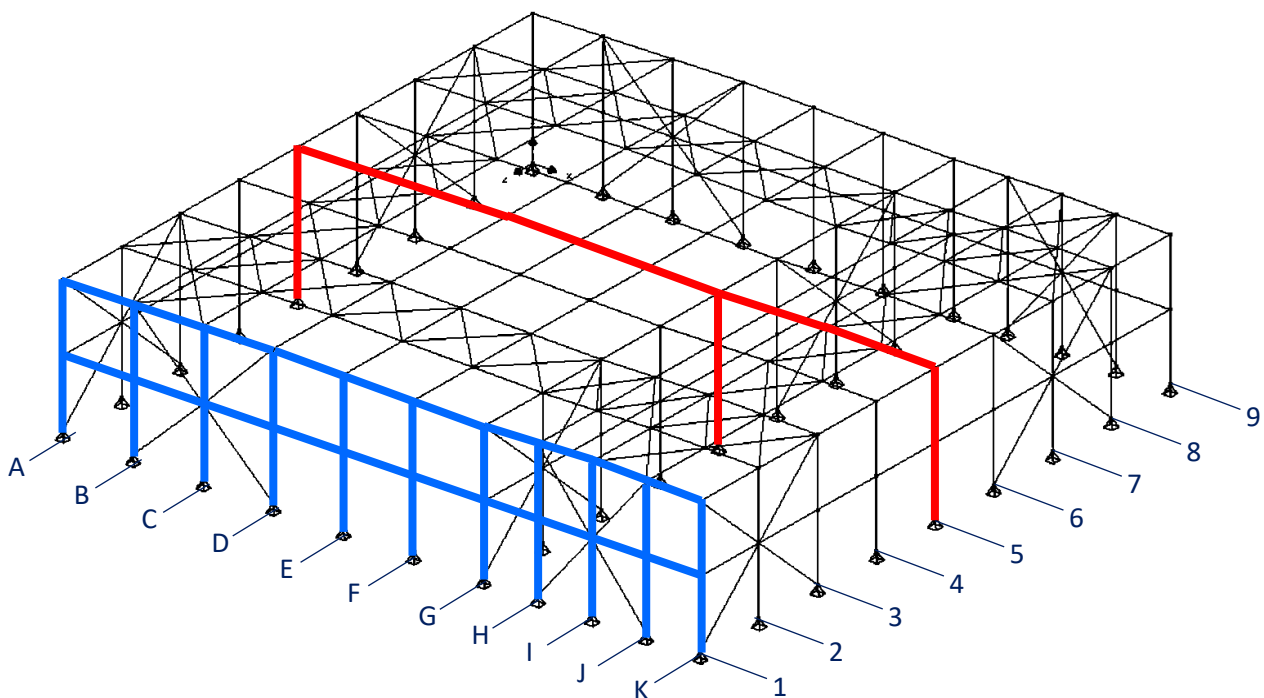
- › De onderste 2,50 m van de gevels bestaan uit betonplaat.
- › De gevels worden geïsoleerd met 200 mm glaswol in een SAB B140/600 binnendoosysteem in de kleur RAL9010 (zie *Bijlage D.6 Dikte van de isolatie* en *Bijlage D.7 Windbelastingen volgens SAB-tabellen* van het Bijlagenboek).
- › Voor de gevelplaat moet worden gekozen voor het type SAB 45KD/1000 in de kleur RAL7012.
- › De gevelplaten moeten verticaal worden aangebracht.
- › De daken worden geïsoleerd met 150 mm PIR-panelen op een SAB 106R+/750 profiel en afgewerkt met bitumen aan de buitenzijde (zie *Bijlage D.6 Dikte van de isolatie* en *Bijlage D.7 Windbelastingen volgens SAB-tabellen* van het Bijlagenboek).
- › De werkplaats en de opslag moeten over de volle breedte overspannen, dus geen kolommen aanbrengen in het midden van de werkplaats en de opslag.
- › De profielen van het binnendoosysteem moeten zijn afgestemd op de isolatie en omstandigheden, zoals winddruk en windzuiging.
- › De profielen van de warmdakplaat moeten zijn afgestemd op de omstandigheden, zoals windzuiging, en in staat zijn om de windzuiging op te vangen en het gewicht van de zonnepanelen, buitenafwerking, isolatie en het eigengewicht af te dragen.
- › De maximale te transporteren lengte is 18,00 m.
- › In de straal- en spuitcabines van de spuitery kunnen constructiedelen met een lengte van 18,00 m worden verwerkt.



Figuur 4: Vooraanzicht met links de werkplaats (35,00 m met 5,83 m stramienafstand) en rechts de opslaghal (18,00 m met 4,50 m stramienafstand). In deze gevel en de achtergevel worden twee windbokken angebracht.



Figuur 5: Zijaanzicht rechts (50,00 m met 6,25 m stramienafstand) met twee windbokken. Het linkerzijaanzicht is gespiegeld aan deze rechterzijgevel.



Figuur 6: 3D zicht van de industriehal. In het rood is het portaal gearceerd dat in dit eindwerk in beschouwing wordt genomen. Eveneens worden de staalprofielen in de kopsgevel (in het blauw gearceerd) bepaald naast de nodige windverbanden en drukstaven.

§ 3.1.2 Algemene uitgangspunten

Eurocode 1: Belastingen op constructies (EN 1991)

- › NEN-EN 1991-1-3: Algemene belastingen – Sneeuwbelasting
- › NEN-EN 1991-1-4: Algemene belastingen – Windbelasting

Eurocode 2: Ontwerp en berekening van betonconstructies (EN 1992)

- › NEN-EN 1992-1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen (NEN 6720)

Eurocode 3: Ontwerp en berekening van staalconstructies (EN 1993)

- › NEN-EN 1993-1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen (NEN 6770)
- › NEN-EN 1993-1-8: Algemene regels – Ontwerp en berekening van verbindingen (NEN 6772)

§ 3.1.3 Bouwwerktype

Omschrijving	: Industriegebouw (1 of 2 bouwlagen) NEN-EN 1990 art. B3.1 Waarbij stabiliteit wordt verzorgd door windverbanden in het dak en windbokken in alle gevels. Het betreft een vierzijdig geschoorde staalconstructie. De begane grond bestaat uit een betonvloer op een doelmatig verdicht zandpakket. De staalconstructie staat op geheide funderingspalen.	
	: Kantoor	
Gevolgklasse	: CC2 (consequence class)	NEN-EN 1990 art. B3.1
	Onder een gevolgklasse CC2 wordt verstaan: “Middelmatige gevolgen ten aanzien van het verlies van mensenlevens, en/of aanzienlijke economische of sociale gevolgen of gevolgen voor de omgeving” (Blok, 2018). De opdrachtgever heeft als eis gesteld dat gevolgklasse CC2 voor de volledige staalconstructie wordt aangehouden.	
Betrouwbaarheidsklasse	: RC2 (reliability class)	NEN-EN 1990 art. B.3.2(2)
Ontwerplevensduurklasse	: 3	NEN-EN 1990 art. A1.1(1)
Ontwerplevensduur	: 50 jaar (gebouwen en andere gewone constructies)	
Gebouwtype	: Industriefunctie/kantoor	
Windgebied	: type II, onbebouwd	
Maximale te transporteren	: 18,00 meter lengtes.	

§ 3.1.4 ψ -factoren voor gebouwen (per klasse)

	ψ_0	ψ_1	ψ_2	NEN-EN 1990 art. A1.2.2
A Woon- en verblijfsruimte	0,4	0,5	0,3	
B Kantoorruimte	0,5	0,5	0,3	
C Bijeenkomst ruimte	0,6/0,4 ^a	0,7	0,6	
D Winkelruimte	0,4	0,7	0,6	
E Opslagruimte en industrie	1,0	0,9	0,8	
F Verkeersruimte, voertuiggewicht < 30kN	0,7	0,7	0,6	
G Verkeersruimte, voertuiggewicht < 160kN	0,7	0,5	0,3	
H Daken	0,0	0,0	0,0	
- Sneeuwbelasting	0,0	0,2	0,0	
- Regenwater	0,0	0,0	0,0	
- Windbelasting	0,0	0,2	0,0	

^a de waarde 0,6 geldt voor delen van het gebouw die in geval van calamiteit zwaar kunnen worden belast door een mensenmenigte (vluchtroutes, trappen); de waarde 0,4 geldt in overige gevallen.

§ 3.1.5 Materiaaleigenschappen

Constructiestaal	: walsprofielen	: S235/S355
	: koker- en buisprofielen	: S275
	: geïntegreerde profielen	: S355
	: windverbanden (profielstaal)	: S235
Boutkwaliteit		: 8.8
Ankerkwaliteit		: 8.8

§ 3.1.6 Belastingcombinaties

Fundamentele belastingcombinaties t.b.v. sterkte

$$q_{Ed} = \Sigma 1,35 \cdot G + \Sigma 1,5 \cdot Q \cdot \psi_0 \quad (\text{verg. 6.10a})$$

$$q_{Ed} = \Sigma 1,2 \cdot G + 1,5 \cdot Q + \Sigma 1,5 \cdot Q \cdot \psi_0 \quad (\text{verg. 6.10b})$$

Karakteristiek t.b.v. doorbuiging

$$q_{kar} = \Sigma 1,0 \cdot G + 1,0 \cdot Q + \Sigma 1,0 \cdot Q \cdot \psi_0 \quad (\text{verg. 6.14b})$$

§ 3.2 Belastingen

§ 3.2.1 Windbelastingen

Voor de volledige berekening: zie *Bijlage E: Windbelastingen*.

Gebouwhoogte, z_e	=	12,00 m
Lengte langsgevel	=	50,00 m
Lengte kopgevel	=	53,00 m
Orografische factor, $c_{0;(z)}$	=	1,00
Stuwdruk, q_p (12,00 m) onbebouwd gebied II 50 jaar	=	0,90 kN/m ²

$C_s C_d$	=	1,00
$C_{pe,10;zone A}$	=	-1,20
$C_{pe,10;zone B}$	=	-0,80
$C_{pe,10;zone C}$	=	-0,50
$C_{pe,10;zone D}$	=	+0,80
$C_{pe,10;zone E}$	=	-0,50
$C_{pe,10;zone F}$ met borstwering / met scherpe dakrand	=	-1,49 / -1,80
$C_{pe,10;zone G}$ met borstwering / met scherpe dakrand	=	-0,99 / -1,20
$C_{pe,10;zone H}$	=	-0,70
$C_{pe,10;zone I}$	=	+/-0,20
$q_w(z) = q_p(h) \cdot c_{pe,10} \cdot C_s C_d$	=	zie bijlage.

§ 3.2.2 Sneeuwbelastingen

Voor de volledige berekening: zie *Bijlage F: Sneeuwbelastingen*.

C_e	=	1,00
C_t	=	1,00
s_k (50 jaar)	=	0,70 kN/m ²
μ_1 (zonder obstakels)	=	0,80
μ_2 (bij obstakels)	=	1,29
$s = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k$ zonder obstakels ($\mu_1 = 0,80$)	=	0,56 kN/m ²
met obstakels ($\mu_2 = 1,29$)	=	0,90 kN/m ²

§ 3.2.3 Wateraccumulaties

Voor de volledige berekening: zie *Bijlage G: Wateraccumulaties*.

Afvoergebied 1, A_1	=	875 m ²
Afvoergebieden 2 en 3, $A_2 + A_3$	=	1325 m ²
Afvoergebied 4, A_4	=	450 m ²
$Q_h = A \cdot i_r$	=	0,044 m ³ /s
$Q_{h,i}$ voor 10 overstorten 60x610 mm	=	0,0044 m ³ /s
$Q_h = (\alpha \cdot i) \cdot (\beta \cdot F)$	=	2981,25 l/min
$Q_{h,i}$ voor 9 afvoeren en 9 noodafvoeren Ø120 met goot B55	=	331,25 l/min
$Q_h = A \cdot i_r$	=	0,023 m ³ /s
$Q_{h,i}$ voor 10 overstorten 60x610 mm	=	0,0023 m ³ /s

§ 3.2.4 Blijvende belastingen

Voor de volledige berekening: zie *Bijlage H: Blijvende belastingen*.

Dak	Buitenafwerking met bitumen	= 0,05 kN/m ²	
	Isolatielaag in plaatvorm	= 0,045 kN/m ²	
	Profiel warmdakplaat	= 0,16 kN/m ²	
	Installaties, leidingen, e.d.	= 0,10 kN/m ²	
		+ _____	
		G _k	= 0,36 kN/m ²
	Zonnepanelen	Q _k	= 0,25 kN/m ²

Gevel	Profielplaat gevel	= 0,062 kN/m ²	
	Isolatielaag	= 0,090 kN/m ²	
	Profielplaat binnendoos	= 0,15 kN/m ²	
	Leidingen, e.d.	= 0,10 kN/m ²	
		+ _____	
		G _k	= 0,40 kN/m ²

4. Resultaten

§ 4.1 Analyse vakwerkligger

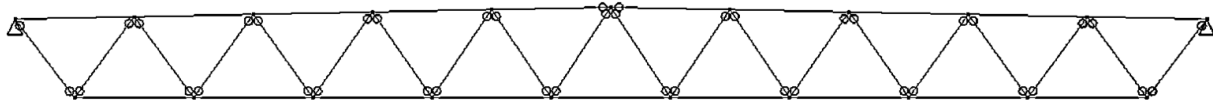
Om definitief aan te kunnen tonen welk vakwerktype het beste past bij de efficiëntiedoelstelling van dit eindwerk zal een analyse worden gemaakt, waarbij een Warren vakwerkligger, Pratt vakwerkligger en Howe vakwerkligger worden geanalyseerd in Diamonds BuildSoft. Voorafgaand hieraan is een eerste selectie gemaakt (in Bijlage J: Vakwerkligger) uit alle soorten vakwerken en is de hoogte en het aantal velden bepaald. Om de vergelijking zuiver te houden worden op voorhand een aantal uitgangspunten vastgesteld waaraan alle vakwerken moeten voldoen:

- › Alle vakwerken bestaan uit 12 velden (10 velden voor de Warren-truss omwille van het ontwerp);
- › Alle vakwerken maken gebruik van de maximale hoogte van 2,29 m aan de randen;
- › Alle vakwerken maken gebruik van de maximale hoogte van 2,64 m in het midden;
- › Alle staven bestaan (voor nu) uit SHS-profielen;
- › De staalsoort voor alle SHS-profielen is aangenomen als S275;
- › Er wordt per vakwerktype één profiel aangemeten voor de bovenrand, onderrand, diagonaal en verticaal. Dus maximaal vier verschillende profielen per vakwerk.
- › Alle vakwerken worden belast met een combinatie van windbelasting en zonnepanelen;
- › Alle vakwerken worden belast met alleen windbelasting;
- › Alle vakwerken worden belast met een combinatie van sneeuwbelasting en zonnepanelen;
- › Alle vakwerken worden gecontroleerd met inachtneming van een aangenomen eenheidscontrole van 85% (0,85) voor sterkte en stabiliteit.

Met een combinatie van computerwerk en handberekeningen worden de SHS-profielen bepaald. Er wordt gecontroleerd op de spanning en de stabiliteit van de staven. Als laatste wordt ook gekeken naar de doorbuiging van de ligger. De volledige berekeningen zijn terug te vinden in Bijlage J: Vakwerkligger. Deze stap in het eindwerk is alleen bedoeld om de verschillen tussen gangbare vakwerkliggertypen aan te kunnen tonen, wat helpt bij het maken van een definitieve keuze voor één vakwerkligger om te worden toegepast op stramienassen B, C, D, E, F, G en H.

§ 4.1.1 Warren vakwerkligger (W-ligger/V-ligger)

In onderstaande figuur 7 is het ontwerp te zien van de Warren vakwerkligger.



Figuur 7: Warren vakwerkligger, zoals gemodelleerd in Diamonds BuildSoft.

Gekozen profielen:

- › Bovenrandstaven = SHS 160x160x8 (doorsnedeklasse 1);
- › Onderrandstaven = SHS 120x120x5 (doorsnedeklasse 1);
- › Diagonalen = SHS 80x80x5 (doorsnedeklasse 1).

Betekenis van de doorsnedenklassen:

- › Klasse 1 (Plastische doorsneden) zijn doorsneden waarin zich een plastisch scharnier kan vormen waarbij de rotatiecapaciteit voldoende is voor de plastische berekening zonder weerstandsverlies (Snijder & Steenbergen, 2011).
- › Klasse 2 (Gedrongen of compacte of semi-plastische doorsneden) zijn doorsneden waar het plastische moment kan worden bereikt doch met beperkte rotatiecapaciteit door lokaal plooien (Snijder & Steenbergen, 2011).
- › Klasse 3 (Semigedrongen of Semi-Compacte of elastische doorsneden) zijn doorsneden waar het elastisch moment kan worden bereikt, doch lokaal plooien verhindert de ontwikkeling van het plastische moment (Snijder & Steenbergen, 2011).
- › Klasse 4 (Slanke doorsneden) zijn doorsneden waar lokaal plooien zal optreden voor het bereiken van de vloeigrens in één of meer delen van de doorsnede (Snijder & Steenbergen, 2011).

Tabel 1: Maximale normaalkrachten.

Warren 1 = windbelasting met zonnepanelen;
 Warren 2 = windbelasting;
 Warren 3 = sneeuw met zonnepanelen;
 M. Warren = maatgevende normaalkrachten Warren.

	Bovenrand		Onderrand		Diagonaal		Verticaal	
	Druk	Trek	Druk	Trek	Druk	Trek	Druk	Trek
Warren 1	442,4	88,9	120,3	452,4	152,5	155,7	-	-
Warren 2	442,4	88,9	120,3	452,4	152,5	155,7	-	-
Warren 3	514,6	-	-	515,7	177,7	181,2	-	-
M. Warren	514,6	88,9	120,3	515,7	177,7	181,2	-	-

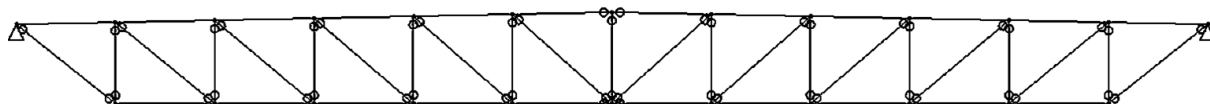
- › Sterktecontrole bovenrandstaaf: $0,40 \leq 1,0$ **SHS 160x160x8** voldoet aan de voorwaarde.
- › Sterktecontrole onderrandstaaf: $0,84 \leq 1,0$ **SHS 120x120x5** voldoet aan de voorwaarde.
- › Sterktecontrole diagonaal: $0,46 \leq 1,0$ **SHS 80x80x5** voldoet aan de voorwaarde.
- › Stabiliteitscontrole bovenrandstaaf: $0,78 \leq 1,0$ **SHS 160x160x8** voldoet aan de voorwaarde.
- › Stabiliteitscontrole onderrandstaaf: $0,51 \leq 1,0$ **SHS 120x120x5** voldoet aan de voorwaarde.
- › Stabiliteitscontrole diagonalen: $0,78 \leq 1,0$ **SHS 80x80x5** voldoet aan de voorwaarde.

In *Bijlage J: Vakwerkligger* van het Bijlagenboek zijn in *Bijlage J.3 Warren vakwerkligger* de uitgebreide berekeningen te vinden voor de bovenrandstaven, onderrandstaven en diagonalen. Alle gekozen profielen voldoen aan de voorwaarden voor spanning en stabiliteit. Naast spanning- en stabiliteitscontroles is het ook belangrijk om te kijken naar de algehele doorbuiging van de vakwerkligger. Uit Diamonds BuildSoft blijkt dat de totale doorbuiging van het vakwerk maximaal 73,3 mm bedraagt in de BGT. De maximale doorbuiging is $u_{max} \leq 0,004 \cdot l \leq 0,004 \cdot 35000 \leq 140 \text{ mm}$, dus een doorbuiging van 73,3 mm voldoet ook aan de doorbuigingseis.

De gekozen profielen voor de bovenrandstaven, onderrandstaven en diagonalen worden gebruikt voor de berekening van het eigengewicht van het vakwerk (te vinden na de analyses). Allereerst wordt dezelfde analyse uitgevoerd voor de Pratt vakwerkligger en de Howe vakwerkligger.

§ 4.1.2 Pratt vakwerkligger (N-ligger op trek)

In onderstaande figuur 8 is het ontwerp te zien van de Pratt vakwerkligger.



Figuur 8: Pratt vakwerkligger, zoals gemodelleerd in Diamonds BuildSoft.

Gekozen profielen:

- › Bovenrandstaven = SHS 160x160x8 (doorsnedeklasse 1);
- › Onderrandstaven = SHS 120x120x5 (doorsnedeklasse 1);
- › Diagonalen = SHS 70x70x5 (doorsnedeklasse 1);
- › Verticalen = SHS 70x70x4 (doorsnedeklasse 1).

Tabel 2: Maximale normaalkrachten.

Pratt 1 = windbelasting met zonnepanelen;

Pratt 2 = windbelasting;

Pratt 3 = sneeuw met zonnepanelen;

M. Pratt = maatgevende normaalkrachten Pratt.

	Bovenrand		Onderrand		Diagonaal		Verticaal	
	Druk	Trek	Druk	Trek	Druk	Trek	Druk	Trek
Pratt 1	443,9	91,1	117,9	450,5	79,4	200,5	122,2	50,0
Pratt 2	443,9	91,1	117,9	450,5	79,4	200,5	122,2	50,0
Pratt 3	516,0	-	-	514,1	-	234,1	142,9	-
M. Pratt	516,0	91,1	117,9	514,1	79,4	234,1	142,9	50,0

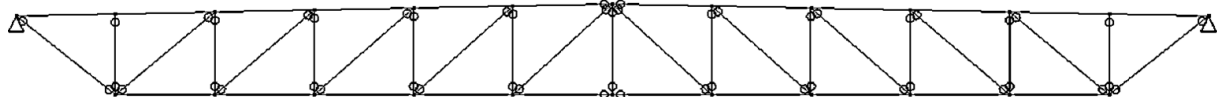
- › Spanningscontrole bovenrandstaven: $0,40 \leq 1,0$ **SHS 160x160x8** voldoet aan de voorwaarde.
- › Spanningscontrole onderrandstaven: $0,84 \leq 1,0$ **SHS 120x120x5** voldoet aan de voorwaarde.
- › Spanningscontrole diagonalen: $0,69 \leq 1,0$ **SHS 70x70x5** voldoet aan de voorwaarde.
- › Spanningscontrole verticalen: $0,51 \leq 1,0$ **SHS 70x70x4** voldoet aan de voorwaarde.
- › Stabiliteitscontrole bovenrandstaven: $0,75 \leq 1,0$ **SHS 160x160x8** voldoet aan de voorwaarde.
- › Stabiliteitscontrole onderrandstaven: $0,50 \leq 1,0$ **SHS 120x120x5** voldoet aan de voorwaarde.
- › Stabiliteitscontrole diagonalen: $0,75 \leq 1,0$ **SHS 70x70x5** voldoet aan de voorwaarde.
- › Stabiliteitscontrole verticalen: $0,78 \leq 1,0$ **SHS 70x70x4** voldoet aan de voorwaarde.

In *Bijlage J: Vakwerkligger* van het Bijlagenboek zijn in *Bijlage J.4 Pratt vakwerkligger* de uitgebreide berekeningen te vinden voor de bovenrandstaven, onderrandstaven, verticalen en diagonalen. Alle

gekozen profielen voldoen aan de voorwaarden voor spanning en stabiliteit. Naast spanning- en stabiliteitscontroles is het ook belangrijk om te kijken naar de algehele doorbuiging van de vakwerk-ligger. Uit Diamonds BuildSoft blijkt dat de totale doorbuiging van het vakwerk maximaal 74,0 mm bedraagt in de BGT. De maximale doorbuiging is $u_{max} \leq 0,004 \cdot l \leq 0,004 \cdot 35000 \leq 140 \text{ mm}$, dus een doorbuiging van 74,0 mm voldoet ook aan de doorbuigingseis.

§ 4.1.3 Howe vakwerkligger (N-ligger op druk)

In onderstaande figuur 9 is het ontwerp te zien van de Howe vakwerkligger.



Figuur 9: Howe vakwerkligger, zoals gemodelleerd in Diamonds BuildSoft.

Gekozen profielen:

- › Bovenrandstaven = SHS 160x160x8 (doorsnedeklasse 1);
- › Onderrandstaven = SHS 120x120x5 (doorsnedeklasse 1);
- › Diagonalen = SHS 90x90x5 (doorsnedeklasse 1);
- › Verticalen = SHS 40x40x4 (doorsnedeklasse 1).

Tabel 3: Maximale normaalkrachten.

Howe 1 = windbelasting met zonnepanelen;

Howe 2 = windbelasting;

Howe 3 = sneeuw met zonnepanelen;

M. Howe = maatgevende normaalkrachten Howe.

	Bovenrand		Onderrand		Diagonaal		Verticaal	
	Druk	Trek	Druk	Trek	Druk	Trek	Druk	Trek
Howe 1	442,8	91,0	117,5	452,9	155,3	200,7	23,1	73,9
Howe 2	442,8	91,0	117,5	452,9	155,3	200,7	23,1	73,9
Howe 3	515,1	-	-	516,3	176,3	234,2	31,1	83,8
M. Howe	515,1	91,0	117,5	516,3	176,3	234,2	31,1	83,8

- › Spanningscontrole bovenrandstaven: $0,40 \leq 1,0$ **SHS 160x160x8** voldoet aan de voorwaarde.
- › Spanningscontrole onderrandstaven: $0,84 \leq 1,0$ **SHS 120x120x5** voldoet aan de voorwaarde.
- › Spanningscontrole diagonalen: $0,52 \leq 1,0$ **SHS 90x90x5** voldoet aan de voorwaarde.
- › Spanningscontrole verticalen: $0,57 \leq 1,0$ **SHS 40x40x4** voldoet aan de voorwaarde.
- › Stabiliteitscontrole bovenrandstaven: $0,74 \leq 1,0$ **RHS 160x160x8** voldoet aan de voorwaarde.
- › Stabiliteitscontrole onderrandstaven: $0,50 \leq 1,0$ **RHS 120x120x5** voldoet aan de voorwaarde.
- › Stabiliteitscontrole diagonalen: $0,82 \leq 1,0$ **SHS 90x90x5** voldoet aan de voorwaarde.
- › Stabiliteitscontrole verticalen: $0,85 \leq 1,0$ **SHS 40x40x4** voldoet aan de voorwaarde.

In *Bijlage J: Vakwerkligger* van het Bijlagenboek zijn in *Bijlage J.5 Howe vakwerkligger* de uitgebreide berekeningen te vinden voor de bovenrandstaven, onderrandstaven, verticalen en diagonalen. Alle gekozen profielen voldoen aan de voorwaarden voor spanning en stabiliteit. Naast spanning- en stabiliteitscontroles is het ook belangrijk om te kijken naar de algehele doorbuiging van de vakwerkligger. Uit het rekenmodel in Diamonds BuildSoft blijkt dat de totale doorbuiging van het vakwerk 78,6 mm bedraagt in de BGT. De maximale doorbuiging is $u_{max} \leq 0,004 \cdot l \leq 0,004 \cdot 35000 \leq 140 \text{ mm}$, dus een doorbuiging van 78,6 mm voldoet ook aan deze doorbuigingseis. Deze profielen worden definitief gebruikt voor de gewichtsberekening van het vakwerk.

§ 4.1.4 Gewichtsberekening

Warren vakwerkligger:

- › 34,79 m bovenrandstaven, 37,7 kg/m SHS 160x160x8, dus een totaalgewicht van 1311 kg;
- › 34,78 m onderrandstaven, 17,8 kg/m SHS 120x120x5, dus een totaalgewicht van 619 kg;
- › 60,11 m diagonalen, 11,5 kg/m SHS 80x80x5, dus een totaalgewicht van 691 kg;

Het totale eigengewicht van de Warren vakwerkligger is **2622 kg**.

Pratt vakwerkligger:

- › 34,79 m bovenrandstaven, 37,7 kg/m SHS 160x160x8, dus een totaalgewicht van 1311 kg;
- › 34,78 m onderrandstaven, 17,8 kg/m SHS 120x120x5, dus een totaalgewicht van 619 kg;
- › 45,33 m diagonalen, 10,0 kg/m SHS 70x70x5, dus een totaalgewicht van 453 kg;
- › 27,29 m verticalen, 8,2 kg/m SHS 70x70x4, dus een totaalgewicht van 224 kg;

Het totale eigengewicht van de Pratt vakwerkligger is **2608 kg**.

Howe vakwerkligger:

- › 34,79 m bovenrandstaven, 37,7 kg/m SHS 160x160x8, dus een totaalgewicht van 1311 kg;
- › 34,78 m onderrandstaven, 17,8 kg/m SHS 120x120x5, dus een totaalgewicht van 619 kg;
- › 45,7088469 m diagonalen, 13,1 kg/m SHS 90x90x5, dus een totaalgewicht van 599 kg;
- › 27,29 m verticalen, 4,4 kg/m SHS 40x40x4, dus een totaalgewicht van 120 kg;

Het totale eigengewicht van de Howe vakwerkligger is **2649 kg**.

Ook als het gaat om de eigengewichten van de vakwerkliggers zijn de verschillen opnieuw erg klein gebleken. De Howe vakwerkligger weegt in theorie 28 kg meer ten aanzien van de Warren vakwerkligger. De Warren vakwerkligger weegt echter weer 14 kg meer dan de Pratt vakwerkligger. De Pratt vakwerkligger is relatief gezien dus het lichtste in gewicht. Belangrijk om erbij te vertellen is dat hier nog geen rekening is gehouden met verbindingen en andere vormen van afwerking; in werkelijkheid zullen de eigengewichten nog verder oplopen. Verder zeggen deze verschillen vrij weinig, omdat het *Tabellenboek voor bouw- en waterbouwkundigen* weer andere gewichten per doorsnede hanteert dan de website van bijvoorbeeld *Dlubal Software, Inc.* waar alle informatie over warmgewalste en koudgewalste profielen te vinden is voor alle profieltypen wereldwijd.

Desalniettemin, wordt op grond van deze bevindingen definitief gekozen voor de Pratt vakwerkligger, omdat dit vakwerktype het beste past bij de efficiëntiedoelstelling van dit eindwerk. Wat betreft praktische haalbaarheid is er een belangrijke optimalisatie/verbetering mogelijk. Het is namelijk lastig om buisprofielen goed te verbinden met een HEA-kolom. Daarom is het beter om de bovenrandstaaf te optimaliseren tot een HEA-profiel. In tegenstelling tot de bovenrandstaaf wordt de onderrandstaaf niet verbonden met de kolommen, waardoor deze gewoon een SHS-profiel kan blijven. Tussen de onderrandstaaf en de kolommen wordt ruimte vrijgehouden, zodat de vakwerkligger kan doorbuigen zonder een extra puntlast op de kolommen te geven. Daarmee wordt extra buigend moment voorkomen en kan het HEA-profiel van de kolommen slanker worden uitgevoerd. De onderrandstaaf komt te liggen in een UNP-profiel die wordt vastgelast aan de kolom, waardoor de onderrandstaaf zijdelings wordt gesteund, wat de kniklengten ten goede komt.

§ 4.1.5 Optimalisatieonderzoek Pratt vakwerkligger

Er zijn verschillende optimalisatieonderzoeken mogelijk: zo kunnen de boven- en onderrandstaaf worden vervangen door een HEA-profiel in staal­soort S235. Het is ook interessant om te weten of het profiel slanker kan door gebruik te maken van staal­soort S355. In de huidige kostenverhouding tussen S235 en S355, is staal­soort S355 circa 2-5% duurder. “De sterktecapaciteit van S355 is 50% sterker ten opzichte van S235 staal. Door het toepassen van S355 staal in plaats van S235 staal in het rekenontwerp kan het staalgewicht van een gebouwconstructie circa 20-25% verlaagd worden, wat een directe kosten- en milieubesparing is” (Pelecon B.V., 2020).

Het optimalisatieonderzoek zal bestaan uit twee delen:

- › *Een optimalisatie waarbij de boven- en onderrandstaaf worden vervangen door HEA-profielen in staal­soort S235. De diagonalen en verticalen blijven hetzelfde en zijn standaard in staal­soort S275.*
- › *Een optimalisatie waarin de uitkomst van de voorgaande optimalisatie wordt meegenomen en waarbij de staal­soort van de HEA-profielen worden vervangen door S355. De diagonalen en verticalen blijven opnieuw hetzelfde en zijn standaard in staal­soort S275.*

Na ieder deel van dit onderzoek wordt een afweging gemaakt waarom het resultaat voordeel oplevert of juist nadelig is. Naast het gewicht van de constructie wordt ook vergeleken met materiaalkosten. Wat over blijft is een scherp geprijsde vakwerkligger die optimaal wordt gebruikt. Ten slotte worden de definitieve sterkte- en stabiliteitscontroles uitgevoerd waarin de uitkomsten van het optimalisatieonderzoek zijn verwerkt. Dit is de vakwerkligger die wordt gebruikt in de variantenstudie.

4.1.5.1 Optimalisatieonderzoek deel 1: HEA-profielen als boven- en onderrandstaven

De eigenschappen van op druk en buiging belaste profielen hangen in belangrijke mate af van de verhouding c/t tussen de breedte en de dikte van de gedrukte plaatdelen waaruit de doorsnede van het profiel is opgebouwd. De boven- en onderrandstaven bestaan uit S235 staal. De diagonalen en verticalen bestaan standaard uit S275 staal.

Gekozen profielen:

- › Bovenrandstaven = HEA 220 (S235) (doorsnedeklasse 1);
- › Onderrandstaven = HEA 140 (S235) (doorsnedeklasse 1);
- › Diagonalen = SHS 70x70x5 (S275) (doorsnedeklasse 1);
- › Verticalen = SHS 70x70x4 (S275) (doorsnedeklasse 1).

Tabel 4: Maximale normaalkrachten.

Pratt 1 = windbelasting met zonnepanelen;

Pratt 2 = windbelasting;

Pratt 3 = sneeuw met zonnepanelen;

M. Pratt = maatgevende normaalkrachten Pratt.

	Bovenrand		Onderrand		Diagonaal		Verticaal	
	Druk	Trek	Druk	Trek	Druk	Trek	Druk	Trek
Pratt 1	458,3	81,0	108,2	463,1	73,7	205,6	124,8	46,8
Pratt 2	458,3	81,0	108,2	463,1	73,7	205,6	124,8	46,8
Pratt 3	530,5	-	-	526,4	-	238,9	145,2	-
M. Pratt	530,5	81,0	108,2	526,4	73,7	238,9	145,2	46,8

- › Spanningscontrole bovenrandstaven: $0,35 \leq 1,0$ **HEA 220** voldoet aan de voorwaarde.
- › Spanningscontrole onderrandstaven: $0,71 \leq 1,0$ **HEA 140** voldoet aan de voorwaarde.
- › Spanningscontrole diagonalen: $0,70 \leq 1,0$ **SHS 70x70x5** voldoet aan de voorwaarde.
- › Spanningscontrole verticalen: $0,52 \leq 1,0$ **SHS 70x70x4** voldoet aan de voorwaarde.
- › Stabiliteitscontrole bovenrandstaven: $0,81 \leq 1,0$ **HEA 220** voldoet aan de voorwaarde.
- › Stabiliteitscontrole onderrandstaven: $0,63 \leq 1,0$ **HEA 140** voldoet aan de voorwaarde.
- › Stabiliteitscontrole diagonalen: $0,70 \leq 1,0$ **SHS 70x70x5** voldoet aan de voorwaarde.
- › Stabiliteitscontrole verticalen: $0,79 \leq 1,0$ **SHS 70x70x4** voldoet aan de voorwaarde.

In *Bijlage J: Vakwerkligger* van het Bijlagenboek zijn in *Bijlage J.6 Optimalisatie onderzoek deel 1: HEA-profielen als boven- en onderrandstaven* de uitgebreide berekeningen te vinden bij deze optimalisatie. Alle gekozen profielen voldoen aan de voorwaarden voor spanning en stabiliteit. Naast spanning- en stabiliteitscontroles is het ook belangrijk om te kijken naar de algehele doorbuiging van de vakwerkligger. Uit het rekenmodel in Diamonds BuildSoft blijkt dat de totale doorbuiging van het vakwerk 58,9 mm bedraagt in de BGT. De maximale doorbuiging is $u_{max} \leq 0,004 \cdot l \leq 0,004 \cdot 35000 \leq 140 \text{ mm}$, dus een doorbuiging van 58,9 mm voldoet ook aan deze doorbuigingseis. Deze profielen worden definitief gebruikt voor de berekening van het eigengewicht van het vakwerk.

Pratt vakwerkligger na optimalisatie:

- › 34,79 m bovenrandstaven, 50,5 kg/m HEA 220, dus een totaalgewicht van 1757 kg;
- › 34,78 m onderrandstaven, 24,7 kg/m HEA 140, dus een totaalgewicht van 859 kg;
- › 45,33 m diagonalen, 10,0 kg/m SHS 70x70x5, dus een totaalgewicht van 453 kg;
- › 27,29 m verticalen, 8,2 kg/m SHS 70x70x4, dus een totaalgewicht van 224 kg;

Het totale eigengewicht van het Pratt vakwerkligger is **3293 kg**.

De Pratt vakwerkligger is 685 kg zwaarder na deze eerste optimalisatie. De HEA-profielen hebben een groter gewicht per doorsnede, waardoor bij een aanzienlijk aantal meters het aantal kilo's staal snel toeneemt. Wat betreft de bovenrandstaaf is deze optimalisatie nodig omwille van haalbaarheid en een eenvoudigere fabricage en montage. Door een HEA-profiel als bovenrandstaaf te nemen zijn er meerdere opties om een goede boutverbinding te maken met de kolommen.

Echter bestaan er geen praktische redenen om voor een HEA-profiel te kiezen als onderrandstaaf; de buisprofielen moeten voornamelijk worden vastgelast en de onderrandstaaf maakt geen verbinding met de kolommen. Bij nader inzien gaat het in dit geval dus alleen om het gewicht van het profiel per meter. Een HEA 140 (S235) weegt 24,7 kg/m, maar een SHS 120x120x5 (S275) weegt 17,8 kg/m. Dat betekent dat, als er wordt ontworpen op het aantal kilo's, er in totaal 240 kg uitgespaard kan worden door te kiezen voor een SHS 120x120x5 (S275). Door het verschil in de kiloprijs zijn spanten uitgevoerd in gewalste profielen toch goedkoper en dus interessanter, ondanks het grotere gewicht. Voor de opdrachtgever weegt de prijs het zwaarste mee, dus wordt toch gekozen voor HEA 140 (S235) als onderrandstaaf.

4.1.5.2 Optimalisatieonderzoek deel 2: HEA-profielen in staalkwaliteit S335

Nu de profieltypen definitief zijn vastgesteld in het eerste deel van het optimalisatieonderzoek, is het interessant om te weten wat de invloed is van de staalkwaliteit. Staalkwaliteit S355 is aanzienlijk sterker tegen een kleine toename in de prijs ten opzichte van S235 staal. Het doel is het verkleinen van de HEA-profielen om het gewicht te reduceren en zo nog meer kosten te besparen. Dat betekent dat de bovenrandstaaf een HEA 200 moet worden en de onderrandstaaf een HEA 120. Als dit niet het gewenste resultaat oplevert is bewezen dat het beter is om te kiezen voor HEA 220 en HEA 140 in de staalsoort S235.

De eigenschappen van op druk en buiging belaste profielen hangen in belangrijke mate af van de verhouding c/t tussen de breedte en de dikte van de gedrukte plaatdelen waaruit de doorsnede van het profiel is opgebouwd. Deze optimalisatie is alleen zinvol als het profiel slanker wordt, dus om te beginnen wordt gekozen voor een HEA 200 (was HEA 220 in S235) als bovenrandstaaf en een HEA 120 (S355) als onderrandstaaf. De diagonalen en verticalen bestaan standaard uit S275 staal.

Gekozen profielen:

- › Bovenrandstaven = HEA 200 (S355) (doorsnedeklasse 1);
- › Onderrandstaven = HEA 120 (S355) (doorsnedeklasse 1);
- › Diagonalen = SHS 70x70x5 (S275) (doorsnedeklasse 1);
- › Verticalen = SHS 70x70x4 (S275) (doorsnedeklasse 1).

Tabel 5: Maximale normaalkrachten.

Pratt 1 = windbelasting met zonnepanelen;

Pratt 2 = windbelasting;

Pratt 3 = sneeuw met zonnepanelen;

M. Pratt = maatgevende normaalkrachten Pratt.

	Bovenrand		Onderrand		Diagonaal		Verticaal	
	Druk	Trek	Druk	Trek	Druk	Trek	Druk	Trek
Pratt 1	449,4	87,0	113,8	454,9	77,0	202,2	123,0	48,7
Pratt 2	449,4	87,0	113,8	454,9	77,0	202,2	123,0	48,7
Pratt 3	521,6	-	-	518,3	-	235,6	143,6	-
M. Pratt	521,6	87,0	113,8	518,3	77,0	235,6	143,6	48,7

Uit de uitgebreide stabiliteitsberekening van de bovenrandstaaf, in *Bijlage J.7 Optimalisatie onderzoek deel 2: HEA-profielen in staalkwaliteit S355* in *Bijlage J: Vakwerkligger* van het Bijlagenboek, blijkt dat de eenheidscontrole de beoogde 85% overschrijdt, dus in dit geval blijft er relatief weinig marge over om bezwijken te voorkomen. De onderrandstaaf presteert met 98% nog slechter. Om meer marge te krijgen in de boven- en onderrandstaven is het dus beter om te kiezen voor een HEA 220 als bovenrandstaaf en een HEA 140 als onderrandstaaf, beiden in staalsoort S235, zoals in de eerste optimalisatie was gekozen. De conclusie is dus dat een hogere staalkwaliteit er niet voor zorgt dat het HEA-profiel slanker kan worden uitgevoerd.

4.1.5.3 Definitieve vakwerkligger

Door de optimalisatie weten we nu dat:

- › SHS-buisprofielen lichter zijn dan HEA-profielen, maar HEA-profielen zijn een beter toepassing voor het maken van boutverbindingen met HEA-kolommen.
- › SHS-buisprofielen zijn duurder dan gewalste HEA-profielen. Prijstechnisch is het dus interessanter om de boven- en onderrandstaven in HEA-profielen te doen.
- › Een hogere staalkwaliteit voor de HEA-profielen levert geen verantwoorde profieloptimalisaties op en dus ook geen gewichtsreductie. Met andere woorden, met staalsoort S235 wordt hetzelfde resultaat bereikt en worden de extra kosten voor staalkwaliteit S355 uitgespaard.

De definitieve vakwerkligger is hetzelfde als in het eerste deel van de optimalisatie en bestaat dus uit:

- › Bovenrandstaaf HEA 220 in S235;
- › Onderrandstaaf HEA 140 in S235;
- › Diagonalen SHS 70x70x5 in S275;
- › Verticalen SHS 70x70x4 in S275.

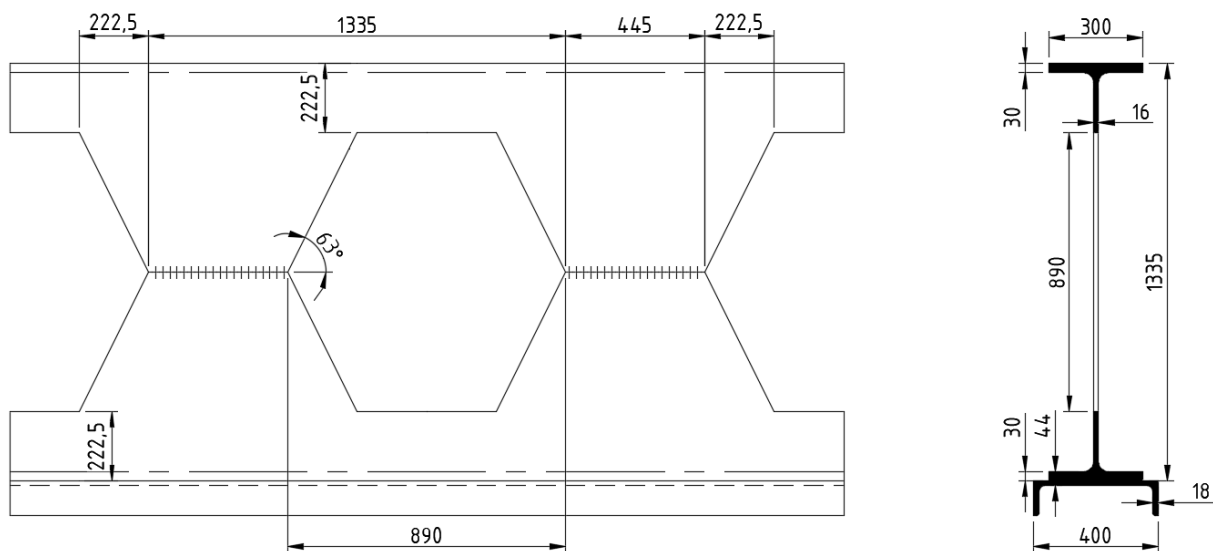
De definitieve vakwerkligger weegt in totaal 3293 kg, zoals in *Paragraaf 4.1.5.1 Optimalisatieonderzoek deel 1: HEA-profielen als boven- en onderrandstaven* en *Bijlage J.6 Optimalisatieonderzoek deel 1: HEA-profielen als boven- en onderrandstaven* in het Bijlagenboek is bepaald. Langs de overspanning van de vakwerkligger worden enkele kipsteunen aangebracht. Hierbij gaat het om L 60x60x6 profielen die een verbinding vormen tussen de onderrandstaaf en het dakvlak. Deze hoekstalen zijn de kleinst mogelijk hoekstalen om zonder problemen op maat te zagen en is ook in staat om een drukkracht vanuit de vakwerkligger op te vangen. Het was ook mogelijk om strippen toe te passen, maar dan kunnen alleen trekkrachten worden opgevangen en moeten aan beide zijden van de vakwerkligger kipsteunen worden aangebracht, wat zorgt voor meer verbindingen en dus meer productie- en montage werk. Dit wordt voorkomen door een hoekstaal toe te passen.

§ 4.2 Analyse raatligger

Om het ontwerp van de raatligger vast te kunnen stellen zijn verschillende raatliggers bepaald. Allereerst is een IPE 600 toegepast in staalsoort S355. Dit profiel bleek niet te voldoen aan de doorbuigings-eis. Met de bevindingen hieruit is dezelfde berekening opnieuw gedaan voor een HEA 800 in staalsoort S355. Dit profiel bleek niet te voldoen aan de kipstabiliteit. Om de vergelijking met de vakwerkligger zuiver te houden wordt uitgegaan van een gelijkblijvend aantal kipsteunen. Met de bevindingen hieruit is vervolgens dezelfde berekening opnieuw gedaan voor een HEA 900 in staalsoort S355 met aan de onderflens een UNP 400 eveneens in staalsoort S355.

Met een combinatie van computerwerk en handberekeningen wordt de doorsnede bepaald van de raatligger die 35,00 m zal overspannen. Er wordt gecontroleerd op momentweerstand, afschuifweerstand, doorbuiging, plooiën en kipstabiliteit. De volledige berekeningen zijn terug te vinden in Bijlage K: Raatligger.

In onderstaande figuur 10 zijn de afmetingen van de HEA 900 raatligger met een UNP 400 aan de onderflens te zien.



Figuur 10: Afmetingen van de raatligger. De tekening is gemaakt in AutoCAD 2022.

De belastingen worden bepaald aan de hand van drie verschillende rekenmodellen: wind en zonnepanelen, wind zonder zonnepanelen en sneeuw met zonnepalen. De maatgevende resultaten voor dwarskracht, moment en normaalkracht worden ondergebracht in onderstaande tabel. De maatgevende situatie is UGT FC 2 voor alle rekenmodellen bestaande uit eigengewicht, permanente last en wind-/sneeuwlast.

Tabel 6: Maatgevende dwarskracht, moment en normaalkracht uit de rekenmodellen in Diamonds BuildSoft voor diverse variaties met windbelasting, sneeuwbelasting en zonnepanelen.

	Vz	My	N
HEA 900 (wind en zonnepanelen)	-189,0	-1656,1	-54,5
HEA 900 (wind)	-189,0	-1656,1	-54,5
HEA 900 (sneeuw en zonnepanelen)	-214,9	-1823,5	-4,3
Maatgevende resultaten	-214,9	-1823,5	-54,5

- › Doorsnede-classificatie: klasse 3.
- › Toetsing buigend moment: $0,34 \leq 1,0$, dus voldoet aan de voorwaarde.
- › Toetsing dwarskracht (afschuiving): $0,05 \leq 1,0$, dus voldoet aan de voorwaarde.
- › Controle doorbuiging: $85,76 \text{ mm} \leq 140 \text{ mm}$, dus voldoet aan de voorwaarde.
- › Toetsing plooi (op aanraden van BuildSoft): $0,18 \leq 1,0$, dus voldoet aan de voorwaarde.
- › Toetsing kipstabiliteit: $0,91 \leq 1,0$, dus voldoet aan de voorwaarde.

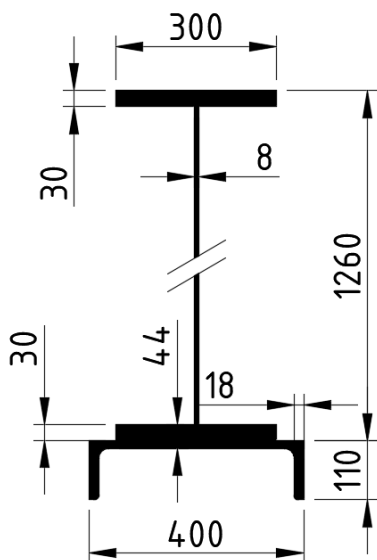
In *Bijlage K: Raatligger* van het Bijlagenboek zijn in *Bijlage K.4 HEA 900 raatligger met UNP 400 (S355)* de uitgebreide berekeningen te vinden bij deze raatligger. Er wordt voldaan aan alle voorwaarden, dus een HEA 900 raatligger met UNP 400 (S355) is de definitieve raatligger.

§ 4.3 Analyse plaatligger

Om het ontwerp van de plaatligger vast te kunnen stellen is in eerste instantie de definitieve raatligger als uitgangspunt genomen. Allereerst is een plaatligger gemaakt in S355 zonder UNP 400 aan de onderflens. Dit profiel bleek ook niet te voldoen aan de kipstabiliteit. Met de bevindingen hieruit is dezelfde berekening opnieuw gedaan voor een plaatligger met een UNP 400 die wel voldeed.

Met een combinatie van computerwerk en handberekeningen wordt de doorsnede bepaald van de raatligger die 35,00 m zal overspannen. Er wordt gecontroleerd op momentweerstand, afschuifweerstand, doorbuiging, plooiën en kipstabiliteit. De volledige berekeningen zijn terug te vinden in Bijlage L: Plaatligger.

In onderstaande figuur 11 zijn de afmetingen van de plaatligger met UNP 400 (S355) te zien.



Figuur 11: Afmetingen van de plaatligger. De tekening is gemaakt in AutoCAD 2022.

De belastingen worden bepaald aan de hand van drie verschillende rekenmodellen: wind en zonnepanelen, wind zonder zonnepanelen en sneeuw met zonnepalen. De maatgevende resultaten voor dwarskracht, moment en normaalkracht worden ondergebracht in onderstaande tabel. De maatgevende situatie is UGT FC 2 voor alle rekenmodellen bestaande uit eigengewicht, permanente last en wind-/sneeuwlast.

Tabel 7: Maatgevende dwarskracht, moment en normaalkracht uit de rekenmodellen in Diamonds BuildSoft voor diverse variaties met windbelasting, sneeuwbelasting en zonnepanelen.

	Vz	My	N
Plaatligger (wind en zonnepanelen)	-181,7	-1591,8	-54,3
Plaatligger (wind)	-181,7	-1591,8	-54,3
Plaatligger (sneeuw en zonnepanelen)	-207,6	-1759,6	-4,2
Maatgevende resultaten	-207,6	-1759,6	-54,3

- › Doorsnede-classificatie: klasse 4.
- › Toetsing buigend moment: $0,41 \leq 1,0$, dus voldoet aan de voorwaarde.
- › Toetsing dwarskracht (afschuiving): $0,10 \leq 1,0$, dus voldoet aan de voorwaarde.
- › Controle doorbuiging: $73,72 \text{ mm} \leq 140 \text{ mm}$, dus voldoet aan de voorwaarde.
- › Toetsing plooï: $0,28 \leq 1,0$, dus voldoet aan de voorwaarde.
- › Toetsing kipstabiliteit: $0,92 \leq 1,0$, dus voldoet aan de voorwaarde.

In *Bijlage L: Plaatligger* van het Bijlagenboek zijn in *Bijlage L.3 Plaatligger (300x30 mm flenzen en 1200x8 mm lijf)* met UNP 400 (S355) de uitgebreide berekeningen te vinden bij deze plaatligger. Er wordt voldaan aan alle voorwaarden, dus een plaatligger (300x30 flenzen en 1200x8 lijf) met UNP 400 (S355) aan de onderflens is de definitieve plaatligger.

§ 4.4. Variantenstudie – Multicriteria-analyse (MCA)

In deze fase van het project is er keuze uit een vakwerkligger, een raatligger en een plaatligger en rest alleen nog de vraag welke van deze overspannende staalconstructies het beste geschikt is om te worden toegepast voor de overspanning van 35,00 meter. Om de beste variant zorgvuldig te kunnen bepalen wordt in deze paragraaf een Variantenstudie uitgevoerd op grond van een multicriteria-analyse (MCA), waarin alle staalconstructies worden getoetst op diverse criteria. Kosten spelen in dit eindwerk een centrale rol, dus wordt gebruik gemaakt van een calculatie, te vinden in Bijlage M: Calculatie van het Bijlagenboek. De bevindingen hieruit vormen de basis voor deze Variantenstudie. Alle bedragen in deze paragraaf zijn per vakwerkligger, raatligger of plaatligger en zijn afgerond op 250 EUR nauwkeurig. Alle staalhoeveelheden zijn afgerond op 50 kg nauwkeurig.

Met de MCA wordt getracht de hoofdvraag te beantwoorden:

Hoe ziet het meest geschikte en kostenefficiënte ontwerp van de stalen bovenbouwconstructie eruit voor de industriehal van een firma te Hulst, met inachtneming van randvoorwaarden en geldende eisen? In zekere zin is de calculatie voldoende om een keuze te maken uit de verschillende liggers. Echter, door gebruik te maken van een MCA kunnen criteria worden meegewogen die niet in geld zijn uit te drukken, zodat het definitieve besluit breder beargumenteert kan worden.

Uit de calculatie blijkt dat de vakwerkligger de beste optie is:

- › Kostprijs per vakwerkligger: 19.500,00 EUR (3.650 kg) 
- › Kostprijs per raatligger: 44.500,00 EUR (13.100 kg) 
- › Kostprijs per plaatligger: 36.250,00 EUR (11.100 kg) 

Er wordt getoetst op basis van de volgende criteria:

- › Materiaalkosten;
- › Productiekosten;
- › Conserveringskosten;
- › Transportkosten;
- › Montage;
- › Veerkrachtigheid, flexibiliteit en vormgeving.

Het belangrijkste onderdeel van deze MCA is het toekennen van punten per criterium, waarbij de punten variëren van -2 tot +2. Wanneer een criterium een score van -2 behaalt, dan betekent dit dat de desbetreffende variant in zijn geheel niet aan het criterium voldoet en dus 'zeer slecht' scoort. Wanneer er een score van +2 wordt toegekend aan een criterium, dan voldoet de desbetreffende variant geheel aan het criterium en dus 'zeer goed' scoort. Een score van 0 geeft aan dat de desbetreffende variant 'neutraal' scoort.

Materiaalkosten

Door de opdrachtgever is aangegeven dat het voornamelijk om de kosten gaat van de staalconstructie, mits er wordt voldaan aan de randvoorwaarden. De staalprijzen zijn de afgelopen tijd explosief

gestegen en inmiddels al ruim verdubbeld ten opzichte van medio 2020, wat de voorkeur voor een scherp geprijsde staalconstructie verder versterkt. In dat opzicht is dit criterium relevanter dan ooit tevoren. De kosten van een staalconstructie zijn maar zo'n 7 tot 13% van de totale kosten voor een gebouw: de investeringskosten, waarin materiaalkosten worden meegerekend (Bouwen met staal, z.d.-b). Toch kan het gaan om grote bedragen. Dit geeft voldoende aanleiding om een wegingsfactor van 50% toe te kennen.

Uit de calculatie is gebleken dat het materiaal voor de vakwerkligger in totaal 6.000,00 EUR kost. Voor een raatligger komen de materiaalkosten uit op bijna een viervoud van dit bedrag; 23.500,00 EUR. Voor de plaatligger komen de materiaalkosten uit op 19.000,00 EUR. Dus als het aankomt op materiaalkosten is een vakwerkligger absoluut de beste keuze. De puntenverdeling is als volgt: +2 punten bij de vakwerkligger, -2 punten bij de raatligger en -1 punt bij de plaatligger. De raatligger brengt de hoogste materiaalkosten met zich mee, hoger dan de kosten voor de plaatligger.

Productiekosten

Door de opdrachtgever is aangegeven dat het voornamelijk om de kosten gaat van de staalconstructie, mits er wordt voldaan aan de randvoorwaarden. In de totaalprijs worden ook andere kosten meegerekend, zoals de productiekosten. "Bij modern verbinden moet de kwaliteit ook steeds vaker onafhankelijk zijn van degene die op dat moment de materialen verbindt. Dat maakt dat lasrobots en -cobots steeds meer te vinden zijn in de moderne werkplaats" (Van der Meer, 2022). Toch vinden lang niet alle laswerkzaamheden plaats met lasrobots. Lasrobots zijn voornamelijk geschikt voor grote en grove lasnaden. De kosten van een staalconstructie zijn maar zo'n 7 tot 13% van de totale kosten voor een gebouw: de investeringskosten, waarin productiekosten worden meegerekend (Bouwen met staal, z.d.-b). Toch kan het gaan om grote bedragen. Materialen kosten wegen vandaag de dag zwaarder mee in de kostprijs van een staalconstructie, wat voldoende aanleiding geeft om een wegingsfactor van 15% toe te kennen.

Productie is een breed begrip. In de calculatie wordt met betrekking tot deze bewerkingen onderscheid gemaakt in 'kop en voetplaten', lasbenodigdheden, zaagwerk, werkuren, transportkosten, rekenwerk, tekenuren en snijwerk. Tussen de verschillende liggers zijn een aantal grotere verschillen aan te merken. Ten eerste is het aantal kilogrammen voor kop en voetplaten een stuk lager bij vakwerkliggers dan bij raatligger en plaatliggers. Ten tweede zijn er 'slechts' 64 werkuren nodig voor het maken van een plaatligger. Voor een vakwerkligger zijn 88 werkuren nodig en voor een raatligger 80 werkuren. Tegen een tarief van 80,00 EUR/uur is een vakwerkligger fors duurder dan een plaatligger. Het laswerk van een plaatligger kan namelijk met een lasrobot gebeuren, terwijl het vakwerk handmatig moet worden gefabriceerd. Ten derde is er geen snijwerk voor de vakwerkligger. Als laatste zijn er meer tekeningen nodig bij een vakwerkligger dan voor een plaatligger. Voor het tekenen van een plaatligger zijn 8 uren gerekend tegen een tarief van 57,00 EUR/uur. Voor het tekenen van een raatligger is het dubbele aantal uren nodig en voor een vakwerkligger het viervoudige. Onderaan de streep komt de plaatligger met een bedrag van 8.250,00 EUR het beste uit de test als het aankomt op productiekosten. De vakwerkligger is met 8.500,00 EUR iets duurder en de raatligger is met 10.000,00 EUR het duurste.

De puntenverdeling is als volgt: +1 punt bij de vakwerkligger, 0 punten bij de raatligger en +2 punten bij de plaatligger.

Conservering

Staal heeft de eigenschap dat het moet worden beschermd tegen luchtzuurstof, zout en vocht. Als het niet ter behoud en conservering wordt behandeld, dan zal ijzerroest optreden en wordt de levensduur van de constructie beperkt. Er zijn talloze manieren ter conservering en behoud van een stalen voorwerp. De meest voorkomende conserveringsmethoden zijn natlakken, poedercoating (ook wel poederlakken) en thermisch verzinken (De Koninggroep, 2019). De staalconstructie van de industriehal wordt geconserveerd door middel van natlakken. Er wordt een wegingsfactor toegekend van 5%.

In de calculatie is aangenomen dat de ligger worden geconserveerd met zinkfosfaatprimer. Afhankelijk van de oppervlakte en het aanbrengen is de prijs berekend tegen een standaardtarief van 7,50 EUR/m² voor het gebruik van een verfspuitrobot en 12,00 EUR/m² voor handmatig spuitwerk. Uit de calculatie is gebleken dat de conservering van de vakwerkligger 1.250,00 EUR gaat kosten. De conservering van de vakwerkligger dient handmatig te gebeuren, zodat alle staven langs alle zijden, die goed zijn voor een totale oppervlakte van ca. 92,57 m², goed geconserveerd worden. Verder blijkt dat de conservering van de raatligger eveneens bij benadering 1.250,00 EUR gaat kosten en voor de plaatligger 1.500,00 EUR. Wat betreft de raatligger, met om een oppervlakte van ca. 151 m², en de plaatligger, met een oppervlakte van ca. 173 m², kan dit door een verfspuitrobot worden uitgevoerd, wat arbeidskosten uitspaart. De puntenverdeling is als volgt: -2 punten bij de vakwerkligger, -1 punt bij de raatligger en -2 punten bij de plaatligger.

Transportkosten

Het aantal transporten wordt bepaald door de lengte en de grootte van de constructiedelen. De constructiedelen worden getransporteerd van de groothandel naar de werkplaats van IBS Staalbouw in Kloosterzande. Na het productieproces worden de liggers getransporteerd naar de straler/spuiterij. Vervolgens worden de constructiedelen getransporteerd naar de bouwlocatie op het bedrijventerrein van Hulst. Er wordt een wegingsfactor toegekend van 15%, omdat transport altijd gepaard gaat met risico's op ongevallen of schades aan de vracht.

In de calculatie zijn de transportkosten niet verder gedetailleerd. De inschatting is dat één vracht kan bestaan uit 6 delen van de vakwerkligger, 8 delen van de raatligger en 10 delen van de plaatligger. Tegen een tarief van 80,00 EUR per gereden kilometer lopen de kosten enorm uiteen bij 9 portalen. Voor een vakwerkligger en de raatligger zal het transport in 6 fases (3 fases van de IBS Staalbouw werkplaats naar de spuiterij en 3 fases van de spuiterij naar de bouwlocatie) moeten plaatsvinden. Voor de plaatligger kan alles in 4 fases (2 fases van de IBS Staalbouw werkplaats naar de spuiterij en 2 fases van de spuiterij naar de bouwlocatie) worden getransporteerd naar de bouwlocatie. De puntenverdeling is als volgt: -1 punt bij de vakwerkligger, -1 punt bij de raatligger en +1 punt bij de plaatligger.

Montage

Nadat de constructiedelen zijn afgeleverd op de bouwlocatie, kan het montage proces beginnen. Alvorens er liggers in kunnen worden gehesen moeten de liggerdelen worden vastgebout. Afhankelijk van het eigengewicht van de liggers is een hijsplan gemaakt met één of wellicht twee telescoopkranen. Gezien het feit dat de industriehal in de hoek linksachter van het perceel kom te staan, is er geen ruimte om twee telescoopkranen te laten hijsen, dus de voorkeur gaat uit naar één telescoopkraan, waardoor de kosten bepaald worden door de zwaarte van het materieel. Er wordt een wegingsfactor van 5% toegekend, omdat een goede en veilig montage veel arbeidsuren vergt. De puntenverdeling is als volgt: +1 punt bij de vakwerkligger, -1 punt bij de raatligger en -1 punt bij de plaatligger.

Veerkrachtigheid, flexibiliteit en vormgeving

Na de oplevering van de industriehal begint de gebruiksfase. Om een veilige werkplek te creëren zullen diverse systemen voor licht en geluid worden gemonteerd aan de liggers en de kolommen. Het is daarom prettig dat de ligger ruimte biedt voor het aanbrengen van kabels en leidingen, zodat zonder aanpassingen diverse systemen kunnen worden aangebracht. Dit wordt gezien als de veerkrachtigheid en de flexibiliteit van de staalconstructie. Wat betreft vormgeving gaat het voornamelijk om de functionaliteit en niet om de esthetiek. De opdrachtgever heeft aangegeven een minimale vrije hoogte van 9,00 m te willen in de werkplaats. Het pand hoeft dus niet 12,00 m hoog te zijn, dus met de toepassing van een raatligger of plaatligger kan 1,00 m extra hoogte worden uitgespaard ten aanzien van een vakwerkligger met een hoogte van 2,64 m. Hierdoor kan de hoogte van het dak en de gevels worden verlaagd, waardoor minder isolatie en plaatwerk nodig zijn. Er wordt daarom een wegingsfactor van 10% toegekend. De puntenverdeling is als volgt: +1 punt bij de vakwerkligger, +2 punt bij de raatligger en -2 punt bij de plaatligger.

Tabel 8: Lijst met criteria en de bijbehorende wegingsfactoren.

Criteria	Wegingsfactor
<i>Materiaalkosten</i>	50%
<i>Productiekosten</i>	15%
<i>Conservering</i>	5%
<i>Transportkosten</i>	15%
<i>Montage</i>	5%
<i>Veerkrachtigheid, flexibiliteit en vormgeving</i>	10%
Totaal	100%

Nu aan iedere variant wegingsfactoren en punten zijn toegekend, kunnen alle eindscores worden berekend. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de volgende formule:

$$\left(\frac{\text{wegingsfactor bij het criterium}}{100} \right) \cdot \text{aantal toegekende punten}$$

Tabel 9: Multicriteria-analyse (MCA).

	Wegingsfactor	Vakwerkligger	Raatligger	Plaatligger
<i>Materiaalkosten</i>	50%	+2	-2	-1
<i>Productiekosten</i>	15%	+1	0	+2
<i>Conservering</i>	5%	-2	-1	-2
<i>Transportkosten</i>	15%	-1	-1	+1
<i>Montage</i>	5%	+1	-1	-1
<i>Veerkrachtigheid, flexibiliteit en vormgeving</i>	10%	+1	+2	-2
Eindscore	100%	+1,80	-1,05	-0,40

Aan de hand van bovenstaande tabel 9 kan men het volgende concluderen: de vakwerkligger komt het beste uit de MCA. Met de verdubbeling van de staalprijzen, gevolgd door de snelle stijging van de afgelopen maanden (maart 2022) wegen de kosten voor productie, conservering, transport en montage minder zwaar op tegen de materiaalkosten. Verder blijft de doorbuiging van de vakwerkligger gering, waardoor minder voorzorgsmaatregelen getroffen moeten worden om het negatieve effect van de doorbuiging op te heffen. Het is dus geen verrassing dat de variant met het kleinste eigengewicht het beste uit de test komt. De voorkeur van de opdrachtgever is ten alle tijden leidend in dit project. De opdrachtgever heeft aangegeven dat deze analyse een duidelijk argument is en dat dit ervoor zorgt dat de voorkeur uitgaat naar een vakwerkligger. Een ander argument voor deze keuze is het lage eigengewicht waardoor kolommen minder zwaar worden belast op druk. Voor stabiliteit is dit het meest gunstige uitgangspunt.

§ 4.5 Analyse standaardligger opslaghal

De liggers in de opslaghal maken overspanningen van 18,00 m. In zekere zin is het mogelijk om een raatligger toe te passen, maar dit vraagt om extra bewerkingen die extra kosten met zich meebrengen. Er wordt daarom gekozen voor een standaard I-profiel IPE 550 in staalsoort S235. Daarnaast is gebleken dat een raatligger weinig kipstabiliteit in zich heeft vanwege de hoogte van het profiel, waardoor alsnog voor een verzwaring van het profiel moet worden gekozen. Vandaar de keuze voor een IPE 550 (S235). Dit bemoeilijkt wel de doorvoer van kabels, leidingen en andere installaties en systemen, maar het alternatief dat hiervoor bestaat is het maken van bevestigingen aan de onderflenzen.

De belastingen worden bepaald aan de hand van drie verschillende rekenmodellen: wind en zonnepanelen, wind zonder zonnepanelen en sneeuw met zonnepanelen. De wind staat hierbij gericht op de langsgevel in as K. Verder is de verwachting dat het dak het zwaarste wordt belast in situaties met sneeuw én zonnepanelen. De maatgevende resultaten voor dwarskracht, moment en normaalkracht worden ondergebracht in onderstaande tabel. De maatgevende situatie is UGT FC 2 voor alle rekenmodellen bestaande uit eigengewicht, permanente last en wind-/sneeuwlast.

Tabel 10: Maatgevende dwarskracht, moment en normaalkracht uit de rekenmodellen in Diamonds BuildSoft voor diverse variaties met windbelasting, sneeuwbelasting en zonnepanelen.

	Vz	My	N
IPE 550 (wind en zonnepanelen)	-73,6	-332,1	-88,3
IPE 550 (wind)	-73,6	-332,1	-52,0
IPE 550 (sneeuw en zonnepanelen)	-90,1	-380,3	-1,8
Maatgevende resultaten	-207,6	-1759,6	-54,3

- › Doorsnede-classificatie: klasse 1.
- › Toetsing buigend moment: $0,58 \leq 1,0$, dus voldoet aan de voorwaarde.
- › Toetsing dwarskracht (afschuiving): $0,09 \leq 1,0$, dus voldoet aan de voorwaarde.
- › Controle doorbuiging: $67,02 \text{ mm} \leq 72 \text{ mm}$, dus voldoet aan de voorwaarde.
- › Toetsing kipstabiliteit: $0,88 \leq 1,0$, dus voldoet aan de voorwaarde.

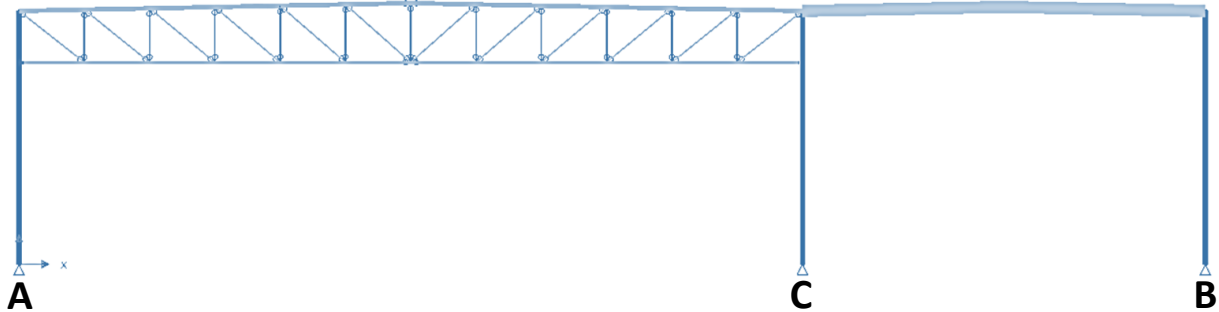
In *Bijlage N: Standaardligger opslaghal* van het Bijlagenboek zijn de uitgebreide berekeningen te vinden bij deze standaardligger die de opslaghal overspant. Er wordt voldaan aan alle voorwaarden.

§ 4.6 Kolommen

Nu de liggers met bijbehorende kipsteunen zijn bepaald voor alle overspanningen. moeten nu ook de resterende constructiedelen, zoals kolommen aan de langsgevels, kolommen aan de kopgevels, windverbanden en drukstaven worden berekend. Voor de kolommen die onderdeel uitmaken van de windbokken en de bovenrandstaaf van de vakwerkligger wordt een tweede controle uitgevoerd, omdat de windbokken zorgen voor een extra drukkracht bij de afdracht van windbelastingen. Het ontwerp (ook wel configuratie genoemd) van de verticale windverbanden (ook wel windbokken genoemd) heeft

plaatselijk invloed op de drukkracht in de kolommen. Het is relevant om te weten welke kolommen er over het algemeen nodig zijn en of het halen van stabiliteit uit een windbok leidt tot profielverzwaring.

In het portaal dat in dit eindwerk wordt beschouwd zijn drie kolommen te vinden die allemaal anders worden belast. Daarom wordt een verdeling gemaakt tussen kolom A (linker buitenkolom), kolom B (rechter buitenkolom) en kolom C (middenkolom).



Figuur 12: Benaming van de kolommen.

§ 4.6.1 Kolom A (linker buitenkolom)

Voor de linker buitenkolom wordt een HEA 280 gekozen in staalsoort S235. De waarden van de snedekrachten M , V en N zijn voor drie doorsnedes langs de hoogte van de kolom: $A = \text{hoogte } 0 \text{ m}$; $C = \text{hoogte } 5,65 \text{ m}$ en $B = \text{hoogte } 11,29 \text{ m}$ voor alle fundamentele combinaties in onderstaande tabel weergegeven. De waarden die in de toetsing worden gebruikt, zijn in onderstaande tabel 11 gekleurd.

Tabel 11: Snedekrachten in de kolom (HEA 280) voor de omhullende fundamentele combinaties.

Enkelvoudige krachten en momenten

- Toetsing van het maximale moment in de kolom in snede C.
- Toetsing van de maximale dwarskracht in de kolom in snede A.
- Toetsing van de maximale normaalkracht in de kolom in snede A.

Combinatie van krachten en momenten

Rood Combinatie van momenten en normaalkracht in snede C;

Blauw Combinatie van dwarskracht en normaalkracht in snede A.

Op druk en buiging belaste staven met kipstabiliteit

Rood Combinatie van moment en normaalkracht in snede C.

		M (kNm)	V (kN)	N (kN)
UGT FC omhullende	A	0	52,3 ^b	176,6
	C	147,5 ^a	0	162,1
Wind en zonnepanelen	B	0	52,3	140,1
	A	0	0	202,7 ^c
Sneeuw	C	0	0	188,2
	B	0	0	166,2

- › Controle doorbuiging: $46,7 \text{ mm} \leq 75,27 \text{ mm}$, dus voldoet aan de voorwaarde.
- › Doorsnedeclassificatie: klasse 1.
- › Toetsing buigend moment: $0,57 \leq 1,0$, dus voldoet aan de voorwaarde.
- › Toetsing dwarskracht (afschuiving): $0,12 \leq 1,0$, dus voldoet aan de voorwaarde.
- › Toetsing normaalkracht (axiale druk): $0,09 \leq 1,0$, dus voldoet aan de voorwaarde.
- › Toetsing combinatie buigend moment en axiale druk: voldoet aan beide voorwaarden, dus geen extra controle vereist.
- › Toetsing combinatie axiale druk en dwarskracht (afschuiving): voldoet aan beide voorwaarden, dus geen extra controle vereist.
- › Toetsing knikstabiliteit om de y-y-as: $0,15 \leq 1,0$, dus voldoet aan de voorwaarde.
- › Toetsing knikstabiliteit om de z-z-as: $0,14 \leq 1,0$, dus voldoet aan de voorwaarde.
- › Toetsing kipstabiliteit: $0,86 \leq 1,0$, dus voldoet aan de voorwaarde.
- › Toetsing combinatie kip- en knikstabiliteit y-y-as: $0,79 \leq 1,0$, dus voldoet aan de voorwaarde.
- › Toetsing combinatie kip- en knikstabiliteit z-z-as: $0,75 \leq 1,0$, dus voldoet aan de voorwaarde.

In *Bijlage O: Kolommen* van het Bijlagenboek zijn in *Bijlage O.1 Kolom A (linker buitenkolom)* de uitgebreide berekeningen te vinden. Er wordt voldaan aan alle voorwaarden, dus een HEA 280 in staal­soort S235 is geschikt om als kolom te worden toegepast.

§ 4.6.2 Kolom B (rechter buitenkolom)

Voor de linker buitenkolom wordt een HEA 280 gekozen in staal­soort S235. De waarden van de snede­krachten M, V en N zijn voor drie doorsnedes: A=0 m; C=5,65 m en B=11,29 m voor alle fundamentele combinaties in onderstaande tabel weergegeven. De waarden die in de toetsing worden gebruikt, zijn in onderstaande tabel 12 gekleurd.

Tabel 12: Snedekrachten in de kolom (HEA 280) voor de omhullende fundamentele combinaties.

Enkelvoudige krachten en momenten

- Toetsing van het maximale moment in de kolom in snede C.
- Toetsing van de maximale dwarskracht in de kolom in snede A.
- Toetsing van de maximale normaalkracht in de kolom in snede A.

Combinatie van krachten en momenten

- Rood** Combinatie van momenten en normaalkracht in snede C;
Blauw Combinatie van dwarskracht en normaalkracht in snede A.

Op druk en buiging belaste staven met kipstabiliteit

- Rood** Combinatie van moment en normaalkracht in snede C.

		M (kNm)	V (kN)	N (kN)
UGT FC omhullende	A	0	36,4 ^b	223,6
Wind en zonnepanelen	C	102,8 ^a	0	218,5
	B	0	36,4	213,4
UGT FC omhullende	A	0	0	254,6 ^c
Sneeuw	C	0	0	249,5
	B	0	0	244,5

- › Controle doorbuiging: $48,4 \text{ mm} \leq 75,27 \text{ mm}$, dus voldoet aan de voorwaarde.
- › Doorsnedeclassificatie: klasse 1.
- › Toetsing buigend moment: $0,39 \leq 1,0$, dus voldoet aan de voorwaarde.
- › Toetsing dwarskracht (afschuiving): $0,08 \leq 1,0$, dus voldoet aan de voorwaarde.
- › Toetsing normaalkracht (axiale druk): $0,11 \leq 1,0$, dus voldoet aan de voorwaarde.
- › Toetsing combinatie buigend moment en axiale druk: $0,40 \leq 1,0$, dus voldoet aan de voorwaarde.
- › Toetsing combinatie axiale druk en dwarskracht (afschuiving): $0,91 \leq 1,0$, dus voldoet aan beide voorwaarden.
- › Toetsing knikstabiliteit om de y-y-as: $0,19 \leq 1,0$, dus voldoet aan de voorwaarde.
- › Toetsing knikstabiliteit om de z-z-as: $0,18 \leq 1,0$, dus voldoet aan de voorwaarde.
- › Toetsing kipstabiliteit: $0,86 \leq 1,0$, dus voldoet aan de voorwaarde.
- › Toetsing combinatie kip- en knikstabiliteit y-y-as: $0,64 \leq 1,0$, dus voldoet aan de voorwaarde.
- › Toetsing combinatie kip- en knikstabiliteit z-z-as: $0,59 \leq 1,0$, dus voldoet aan de voorwaarde.

In *Bijlage O: Kolommen* van het Bijlagenboek zijn in *Bijlage O.2 Kolom B (rechter buitenkolom)* de uitgebreide berekeningen te vinden. Er wordt voldaan aan alle voorwaarden, dus een HEA 280 in staal-soort S235 is geschikt om als kolom te worden toegepast.

§ 4.6.3 Kolom C (middenkolom)

De middenkolom is voornamelijk bedoeld als drager van de dakconstructie in de werkplaats en de opslaghal. Er zijn echter ook situaties denkbaar, waarbij de overheaddeuren van de werkplaats openstaan, maar de deuren van de opslaghal gesloten. Het omgekeerd is ook mogelijk, waarbij de overheaddeuren van de opslaghal openstaan, maar de deuren van de werkplaats gesloten. Voor de berekening gaan we uit van de grootste inwendige winddruk tegen de gevels; $4,3 \text{ kN/m}$.

Voor de linker buitenkolom wordt een HEA 280 gekozen in staalsoort S235. De waarden van de snedekrachten M , V en N zijn voor drie doorsnedes: $A = \text{hoogte } 0 \text{ m}$; $C = \text{hoogte } 5,65 \text{ m}$ en $B = \text{hoogte } 11,29 \text{ m}$ voor alle fundamentele combinaties in onderstaande tabel weergegeven. De waarden die in de toetsing worden gebruikt, zijn in onderstaande tabel 13 gekleurd.

Tabel 13: Snedekrachten in de kolom (HEA 280) voor de omhullende fundamentele combinaties.

Enkelvoudige krachten en momenten

- a. Toetsing van het maximale moment in de kolom in snede C.
 b. Toetsing van de maximale dwarskracht in de kolom in snede A.
 c. Toetsing van de maximale normaalkracht in de kolom in snede A.

Combinatie van krachten en momenten

- Rood** Combinatie van momenten en normaalkracht in snede C;
Blauw Combinatie van dwarskracht en normaalkracht in snede A.

Op druk en buiging belaste staven met kipstabiliteit

- Rood** Combinatie van moment en normaalkracht in snede C.

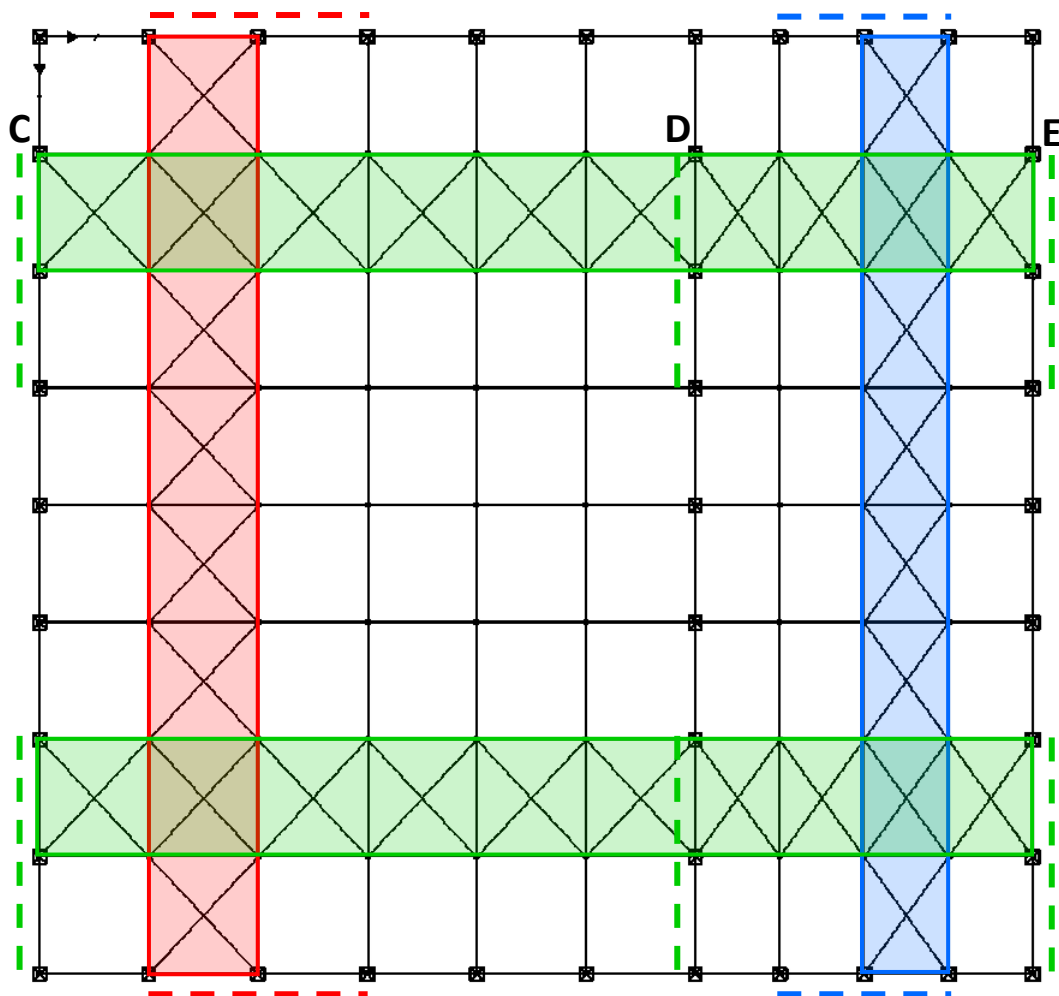
		M (kNm)	V (kN)	N (kN)
UGT FC omhullende	A	0	52,3^b	176,6
Wind en zonnepanelen	C	147,5^a	0	162,1
	B	0	52,3	140,1
UGT FC omhullende	A	0	0	202,7^c
Sneeuw	C	0	0	188,2
	B	0	0	166,2

- › Controle doorbuiging: $46,7 \text{ mm} \leq 75,27 \text{ mm}$, dus voldoet aan de voorwaarde.
- › Doorsnedeclassificatie: klasse 1.
- › Toetsing buigend moment: $0,57 \leq 1,0$, dus voldoet aan de voorwaarde.
- › Toetsing dwarskracht (afschuiving): $0,12 \leq 1,0$, dus voldoet aan de voorwaarde.
- › Toetsing normaalkracht (axiale druk): $0,09 \leq 1,0$, dus voldoet aan de voorwaarde.
- › Toetsing combinatie buigend moment en axiale druk: voldoet aan beide voorwaarden, dus geen extra controle vereist.
- › Toetsing combinatie axiale druk en dwarskracht (afschuiving): voldoet aan beide voorwaarden, dus geen extra controle vereist.
- › Toetsing knikstabiliteit om de y-y-as: $0,15 \leq 1,0$, dus voldoet aan de voorwaarde.
- › Toetsing knikstabiliteit om de z-z-as: $0,14 \leq 1,0$, dus voldoet aan de voorwaarde.
- › Toetsing kipstabiliteit: $0,86 \leq 1,0$, dus voldoet aan de voorwaarde.
- › Toetsing combinatie kip- en knikstabiliteit y-y-as: $0,79 \leq 1,0$, dus voldoet aan de voorwaarde.
- › Toetsing combinatie kip- en knikstabiliteit z-z-as: $0,75 \leq 1,0$, dus voldoet aan de voorwaarde.

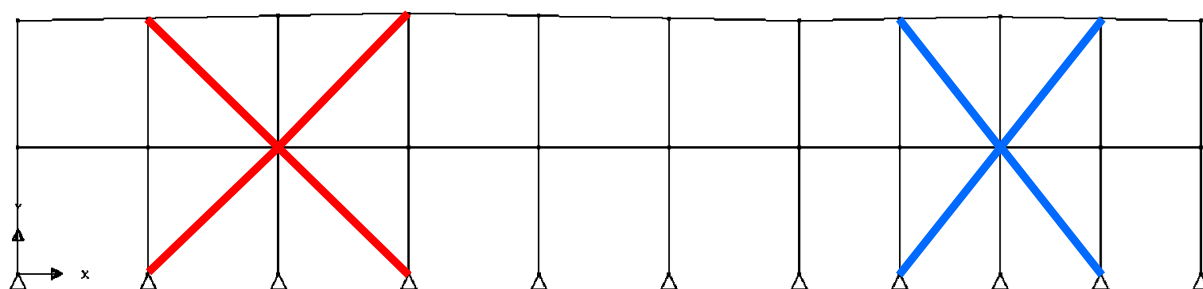
In *Bijlage O: Kolommen* van het Bijlagenboek zijn in *Bijlage O.3 Kolom C (middenkolom)* de uitgebreide berekeningen te vinden. Er wordt voldaan aan alle voorwaarden, dus een HEA 280 in staalsoort S235 is geschikt om als kolom te worden toegepast.

§ 4.7 Windverbanden

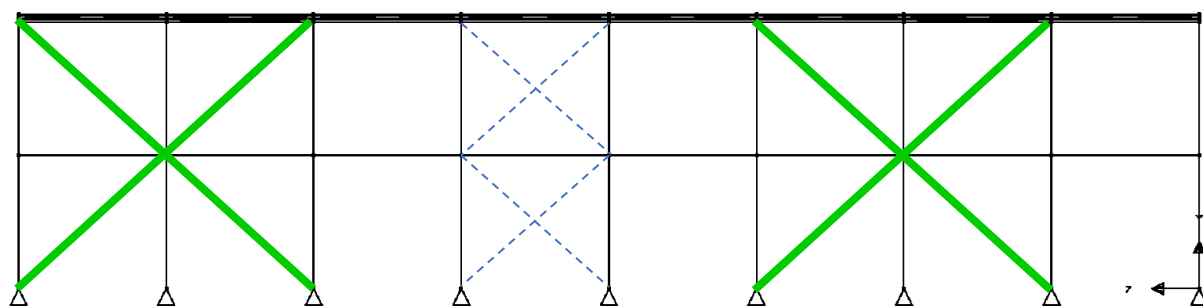
Bij de berekening van de windligger en de windbokken worden verschillende benaming gebruikt: **windligger A**, **windligger B**, **windligger C**, **windligger D** (hetzelfde als windligger C), **windbok A**, **windbok B**, **windbok D**, **windbok D** en **windbok E** (allebei hetzelfde als windbok C, maar anders belast). In onderstaande figuren 13, 14 en 15 zijn de posities van deze constructiedelen te zien.



Figuur 13: Bovenaanzicht. In het rood is windligger A aangegeven. In het blauw is windligger B aangegeven. In het groen in windligger C/D aangegeven. Ook **windbokken C, D en E** zijn hierop aangegeven met stippellijnen, omdat deze tegen elkaar wegvallen in de zijaanzichten.



Figuur 14: Vooraanzicht met windbok A in het rood en B in het blauw.

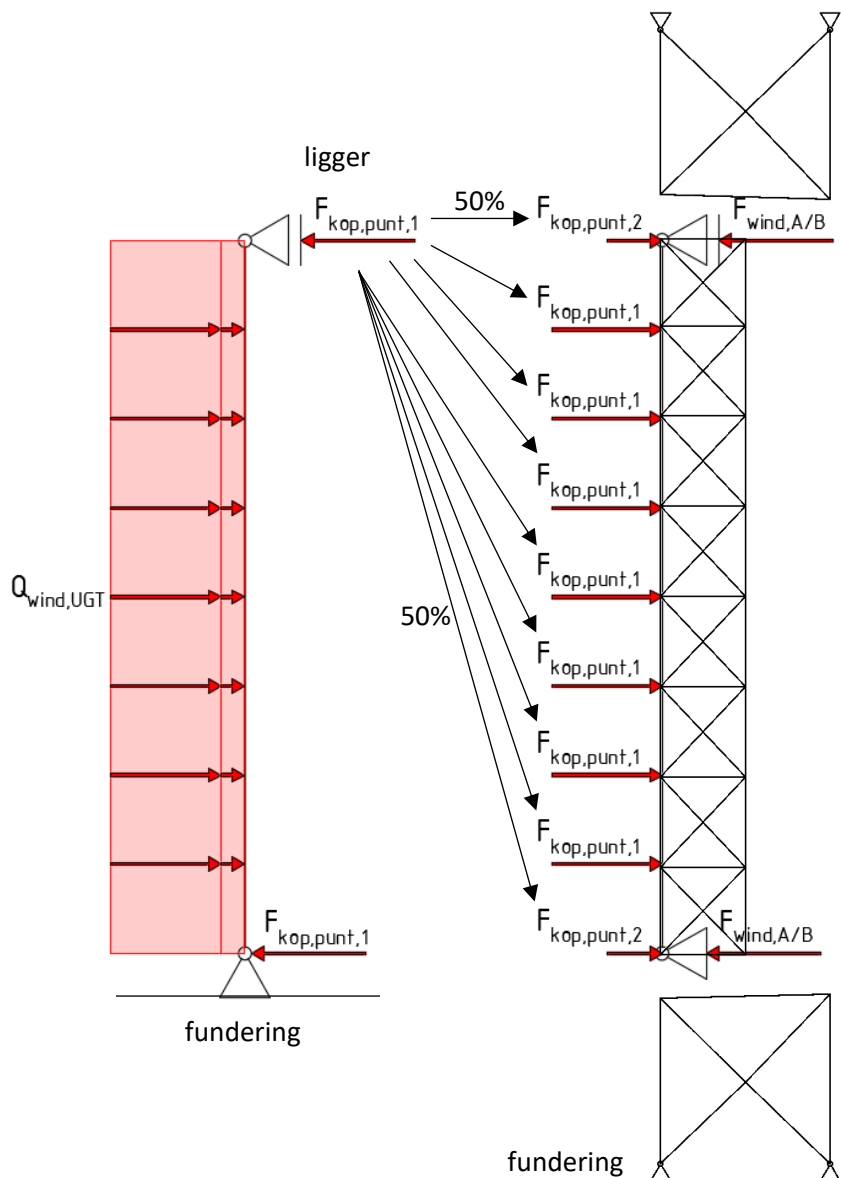


Figuur 15: Rechtersijaaanzicht met windbok C, D en E. In stippellijnen is de configuratie van een windbok aangegeven die in eerste instantie werd aangenomen.

§ 4.7.1 Windligger A en B met afdracht naar windbok A en B

De afdracht van windbelastingen gebeurt als volgt: [1] wind komt op de gevels, waarbij de kolommen fungeren als ligger op twee steunpunten. Slechts de helft van de totale belasting gaat naar de windligger in het dak [2]. De windligger wordt belast met puntlasten die de reactiekrachten zijn van de kolommen. De windligger fungeert eveneens als ligger op twee steunpunten. [3] De reactiekrachten uit de windligger worden opgevangen door de windbokken.

In eerste instantie werd een configuratie aangenomen waarbij twee kruizen van de windbok werden gestapeld. Het gevolg hiervan is dat de reactiekracht uit het bovenste kruis moet worden verschoven via een drukstaaf, waardoor voor het horizontale evenwicht het dubbele van de reactiekracht uit de windligger moet worden afgedragen. Het nadelige effect daarvan is dat kolommen zwaarder worden belast met drukkrachten, dus zijn er zwaardere kolommen nodig, en moet ook de fundering plaatselijk aanzienlijk worden verzwaard. De aanpassing die is gemaakt is één groot windverband over de volledige hoogte, zoals te zien in bovenstaande figuur 15. De drukkrachten in de kolommen halveerde daardoor en een drukstaaf is alleen nog nodig als kipsteun voor de kolommen. Daarnaast zijn minder zware funderingselementen nodig. Het nadeel is dat de kruizen twee velden beslaan en dus eerder een obstakel worden voor ramen, deuren en eventuele installaties in het gebouw.



Figuur 16: Rekenschema van de windbelasting op de kolommen. Links is de windbelasting te zien in de UGT in het verticale vlak. De puntlasten als reactiekracht uit het verticale vlak komen terug in het dak met windliggers A en B (horizontale vlak en is rechts te zien in een bovenaanzicht). De puntlasten als reactiekrachten uit de windliggers worden afgedragen via de windbokken (verticale vlak).

De maatgevende windbelasting voor de trekkrachten in de diagonalen:

- › Gebied D: $q_w(z) = 0,90 \cdot (0,80 + 0,30) \cdot 1,00 = 0,99 \text{ kN/m}^2$;

$$Q_{wind;UGT} = (q_{w;druk} + q_{w;zuiging}) \cdot \gamma_Q \cdot s$$

Waarin:

$q_{w;druk}$	windbelasting in zone D (druk); [0,99 kN/m ²] (resulteert mede in $Q_{wind;UGT}$)
$q_{w;zuiging}$	windbelasting in zone E (zuiging); [-0,18 kN/m ²] (resulteert mede in $Q_{wind;UGT}$)
γ_Q	partiële factor voor veranderlijke belastingen; [1,50]
s	spantafstand; [6,25 m]

Invullen geeft:

$$Q_{wind;UGT} = (0,99 + 0,18) \cdot 1,50 \cdot 6,25 = 10,99 \text{ kN/m}$$

$$F_{kop;punt} = Q_{wind;UGT} \cdot (0,5 \cdot h + h_{rest})$$

Waarin:

$Q_{wind;UGT}$	windbelasting in de uiterste grenstoestand; [10,99 kN/m]
h	hoogte van de windligger (óf de lengte van de kolom); [11,29 m]
h_{rest}	resterende hoogte van de gevel; [0,71 m]

Invullen geeft:

$$F_{kop;punt;1} = 0,5 \cdot Q_{wind;UGT} \cdot (0,5 \cdot h + h_{rest}) = 0,5 \cdot 10,99 \cdot (0,5 \cdot 11,29 + 0,71) = 34,93 \text{ kN}$$

$$F_{kop;punt;2} = \frac{34,93 \text{ kN}}{2} = 17,47 \text{ kN}$$

De windbokken wordt belast met:

$$F_{wind,A/B} = \frac{7 \cdot F_{kop;punt;1} + 2 \cdot F_{kop;punt;2}}{2} = \frac{7 \cdot 34,93 + 2 \cdot 17,47}{2} = 139,72 \text{ kN}$$

Om de staafkrachten in de windligger te kunnen bepalen wordt gebruik gemaakt van Diamonds BuildSoft. De windligger is vergelijkbaar met een vakwerkligger op twee steunpunten belast met verticale puntlasten, zoals voorafgaand is berekend. Door de combinatiefactoren voor het eigengewicht op nul te zetten, wordt het eigengewicht niet meegerekend en worden zo normaalkrachten gevonden ten gevolge van alleen de wind.

Tabel 14: Resultierende trekkkrachten in windligger A. Deze resultaten zijn berekend met Diamonds BuildSoft.

Windligger A	
Staafternummer	Trekkkracht
1, 5	25,6
2, 6	76,8
3, 7	128,0
4, 8	179,2

Tabel 15: Resultierende trekkkrachten in windligger B. Deze resultaten zijn berekend met Diamonds BuildSoft.

Windligger B	
Staafternummer	Trekkkracht
1, 5	29,9
2, 6	89,7
3, 7	149,5
4, 8	209,2

Tabel 16: Resulterende trekkrachten in windbokken A en B. Deze resultaten zijn berekend met Diamonds BuildSoft.

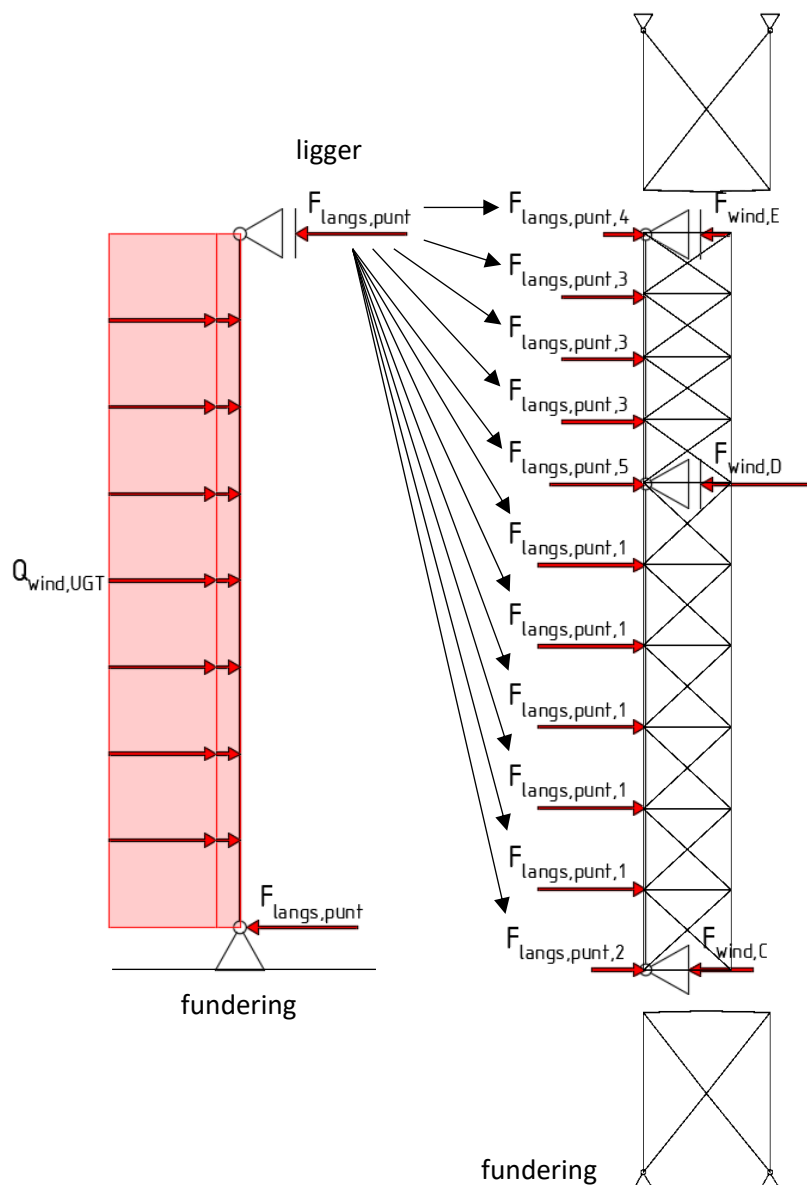
Windbokken	
Staaftnummer	Trekkracht
A	202,1
B	227,4

Tabel 17: Profielen die worden toegepast om de trekkrachten in de windliggers en windbokken op te vangen.

Profielen per windverband	
Windligger A (1, 2, 5 en 6)	L 60x60x6
Windligger A (3, 4, 7 en 8)	L 80x80x8
Windligger B (1, 2, 5 en 6)	L 60x60x6
Windligger B (3, 4, 7 en 8)	L 80x80x10
Windbokken A	Strip 80x15 mm
Windbokken B	Strip 100x15 mm

§ 4.7.2 Windligger C en D met afdracht naar windbok C en D

Voor windligger en windbokken C en D geldt hetzelfde principe als voor windligger en windbokken A en B, alleen steunen de windliggers ditmaal af op drie steunenpunten. Vanwege de horizontale spanrichting gevelbekleding werkt de windbelasting als een q-last op de gevelkolommen.



Figuur 17: Rekenschema van de windbelasting op de kolommen. Links is de windbelasting te zien in de UGT in het verticale vlak. De puntlasten als reactiekracht uit het verticale vlak komen terug in het dak met windliggers C en D (horizontale vlak en is rechts te zien in een bovenaanzicht). De puntlasten als reactiekrachten uit de windligger worden afgedragen via de windbokken (verticale vlak).

De maatgevende windbelasting voor de trekkrachten in de diagonalen:

- › Gebied D: $q_w(z) = 0,90 \cdot (0,80 + 0,30) \cdot 1,00 = 0,99 \text{ kN/m}^2$;
- › Gebied E: $q_w(z) = 0,90 \cdot (-0,50 + 0,30) \cdot 1,00 = -0,18 \text{ kN/m}^2$.

$$Q_{wind;UGT} = (q_{w;druk} + q_{w;zuiging}) \cdot \gamma_Q \cdot s$$

Waarin:

$q_{w;druk}$	windbelasting in zone D (druk); $[0,99 \text{ kN/m}^2]$ (resulteert mede in $Q_{wind;UGT}$)
$q_{w;zuiging}$	windbelasting in zone E (zuiging); $[-0,18 \text{ kN/m}^2]$ (resulteert mede in $Q_{wind;UGT}$)
γ_Q	partiële factor voor veranderlijke belastingen; $[1,50]$
s	spantafstand; $[5,83 \text{ m en } 4,50 \text{ m}]$

Invullen geeft:

$$Q_{wind;UGT} = (0,99 + 0,18) \cdot 1,50 \cdot 5,83 = 10,26 \text{ kN/m}$$

$$Q_{wind;UGT} = (0,99 + 0,18) \cdot 1,50 \cdot 4,50 = 7,92 \text{ kN/m}$$

$$F_{kop;punt} = Q_{wind;UGT} \cdot (0,5 \cdot h + h_{rest})$$

Waarin:

$Q_{wind;UGT}$ windbelasting in de uiterste grenstoestand; [10,26 kN/m en 7,92 kN/m]

h hoogte van de windligger; [11,29 m]

h_{rest} resterende hoogte van de gevel; [0,71 m]

Invullen geeft:

$$F_{langs;punt;1} = 0,5 \cdot Q_{wind;UGT} \cdot (0,5 \cdot h + h_{rest}) = 0,5 \cdot 10,26 \cdot (0,5 \cdot 11,29 + 0,71) = 32,60 \text{ kN}$$

$$F_{langs;punt;2} = \frac{32,60 \text{ kN}}{2} = 16,30 \text{ kN}$$

$$F_{langs;punt;3} = 0,5 \cdot Q_{wind;UGT} \cdot (0,5 \cdot h + h_{rest}) = 0,5 \cdot 7,92 \cdot (0,5 \cdot 11,29 + 0,71) = 25,15 \text{ kN}$$

$$F_{langs;punt;4} = \frac{25,15 \text{ kN}}{2} = 12,58 \text{ kN}$$

$$F_{langs;punt;5} = \frac{32,60 \text{ kN} + 25,15 \text{ kN}}{2} = 28,88 \text{ kN}$$

Om de staafkrachten in de windligger te kunnen bepalen wordt gebruik gemaakt van Diamonds BuildSoft. De windligger is vergelijkbaar met een vakwerkligger op drie steunpunten belast met verticale puntlasten, zoals voorafgaand is berekend. Door de combinatiefactoren voor het eigengewicht op nul te zetten, wordt het eigengewicht niet meegerekend en worden zo normaalkrachten gevonden ten gevolge van alleen de wind.

Tabel 18: Resulterende trekkrachten in windliggers C en D. Deze resultaten zijn berekend met Diamonds BuildSoft.

Windligger C en D	
Staafnummer	Trekkracht
1	18,4
2	63,0
3	107,6
4	26,2
5	70,8
6	115,4
7	53,4
8	22,4
9	8,6
10	39,6

Tabel 19: Resultierende trekkrachten in windbokken C, D en E. Deze resultaten zijn berekend met Diamonds BuildSoft.

Windbokken	
Staafternummer	Trekkraft
C	128,0
D	217,7
E	60,3

Tabel 20: Profielen die nodig zijn om de trekkrachten in de windliggers en windbokken op te vangen.

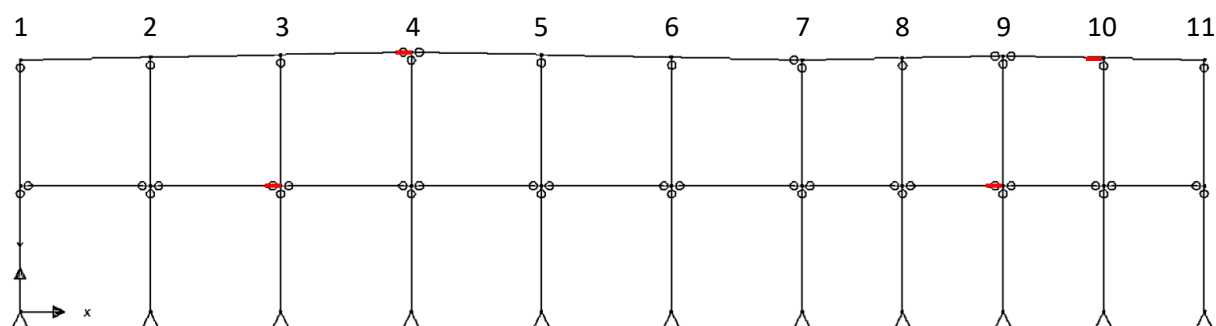
Profielen per windverband	
Windligger C/D (1, 2, 4 en 5)	L 60x60x6
Windligger C/D (3 en 6)	L 70x70x7
Windligger C/D (7, 8, 9 en 10)	L 60x60x6
Windbokken C	Strip 80x10 mm
Windbok D	Strip 100x15 mm
Windbokken E	Strip 60x8 mm

§ 4.8 Kopgevels en tweede controle portaalkolommen

In deze paragraaf worden de staalprofielen van de kolommen, liggers en drukstaven in de kopgevel gedimensioneerd. Op dit punt in het project is het belangrijkste deel van alle resultaten uit de analyse van Diamonds BuildSoft aangetoond met handberekeningen. De werking van de rekensoftware is daarmee bekend en dus is ervoor gekozen om in deze paragraaf gebruik te maken van alleen computerberekeningen. Wat ook opnieuw wordt onderzocht zijn de portaalkolommen ter hoogte van de windbokken. Bij afdracht van windbelastingen treedt hier een extra drukkracht op waar in eerste instantie geen rekening mee is gehouden. Daarom wordt een tweede controle uitgevoerd.

§ 4.8.1 Analyse kopgevels

In onderstaande figuur 18 is het ontwerp te zien van de kopgevels.



Figuur 18: Kopgevels, zoals gemodelleerd in Diamonds BuildSoft. De rode streepjes geven aan dat verplaatsing in de x-richting niet mogelijk is, omdat hier de windverbanden worden aangebracht. Zo treedt er een drukkracht op in de koppelstaven en de liggers in het dak. De liggers in het dak zijn volledig doorgaand met een scharnierende verbinding in de nokken en de randen van het portaal. De nummering van de kolommen correspondeert met de belastingen.

De kopgevel wordt belast met:

- › Het eigengewicht van de staalprofielen; [waardes worden bepaald door Diamonds BuildSoft]
- › Permanente belastingen van de dak- en gevelbekledingen*;
- › Nuttige lasten (H: daken) van de zonnepanelen*;
- › Windbelastingen op de daken en gevels en krachten vanuit de windliggers**;
- › Windbelastingen vanuit de windbokken (afhankelijk van de “voorste” of de “achterste” kopgevel en het aansluitende windbok).

* waarden worden berekend in *Bijlage V: Analyse kopgevels* met gegevens uit *Bijlage H: Blijvende belastingen*.

** waarden worden berekend in *Bijlage V: Analyse kopgevels* met gegevens uit *Bijlage E.2 Wind op de langsgevels*.

Ter plaatse van windbok C wordt de hoekkolom in de kopgevel extra belast met: 84,3 kN

Ter plaatse van windbok D wordt de kolom in de kopgevel extra belast met: 146,0 kN

Ter plaatse van windbok E wordt de hoekkolom in de kopgevel extra belast met: 37,5 kN

OF: in plaats van windbelastingen, wordt het portaal belast met sneeuw. Deze waarden worden eveneens berekend in *Bijlage V: Analyse kopgevels* met gegevens uit *Bijlage F.1 Sneeuwbelasting met handberekeningen*.

Gekozen profielen:

- › Kolommen 1 & 7 = HEA 200 (S235) (doorsnedeklasse 1);
- › Kolommen 2, 3, 4, 8 & 10 = HEA 240 (S355) (doorsnedeklasse 2);
- › Kolommen 5, 6 & 9 = HEA 220 (S355) (doorsnedeklasse 2);
- › Kolom 11 = HEA 180 (S235) (doorsnedeklasse 1);
- › Liggers stramien 1-7 (werkplaats) = HEA 220 (S235) (doorsnedeklasse 1);
- › Liggers stramien 7-11 (opslaghal) = IPE 240 (S235) (doorsnedeklasse 1).

Resultaten uit de sterkte toets bij de maatgevende kolommen bij wind:

- › Kolommen 1 & 7 = HEA 200 (S235): 58%, dus voldoet;
- › Kolommen 2, 3, 4, 8 en 10 = HEA 240 (S355): 54%, dus voldoet;
- › Kolommen 5, 6 & 9 = HEA 220 (S355): 57%, dus voldoet;
- › Kolom 11 = HEA 180 (S235): 46%, dus voldoet;
- › Liggers stramien 1-7 (werkplaats) = HEA 220 (S235): 11%, dus voldoet;
- › Liggers stramien 7-11 (opslaghal) = IPE 240 (S235): 12%, dus voldoet.

Resultaten uit de stabiliteitstoets bij de maatgevende kolommen bij wind:

- › Kolommen 1 & 7 = HEA 200 (S235): 75%, dus voldoet;
- › Kolommen 2, 3, 4, 8 & 10 = HEA 240 (S355): 85%, dus voldoet;
- › Kolommen 5, 6 & 9 = HEA 220 (S355): 85%, dus voldoet;
- › Kolom 11 = HEA 180 (S235): 80%, dus voldoet;
- › Liggers stramien 1-7 (werkplaats) = HEA 220 (S235): 77%, dus voldoet;
- › Liggers stramien 7-11 (opslaghal) = IPE 240 (S235): 62%, dus voldoet.

Voor dezelfde situatie belast met sneeuw, in plaats van wind, wordt de kopgevel minder zwaar belast. De sterkte toets voor alle staven komt maximaal uit op 17% en de stabiliteitstoets komt maximaal uit op 26%, dus de situatie met windbelasting is maatgevend.

Bij het maken van de tekeningen in *Tekla Structures* blijkt dat een HEA 180 (S235) voor kolommen 1, 7 en 11 en een IPE 240 (S235) voor liggers 7-11 (opslaghal) lastig te verbinden zijn met de windbokken, de drukstaven en de kolommen. Het is daarom beter om de staalprofielen van kolommen 1, 7 en 11 te vervangen voor een HEA 220 (S235) en liggers 7-11 eveneens te vervangen voor een HEA 220 (S235). Op de hoeken van de gevels zijn zwaardere kolommen nodig om boutverbindingen de ruimte te geven die nodig is voor de montage. Verder is de ligger van de opslaghal verzwaaard van HEA 200 naar HEA 220, zodat de hoekstalen van de windliggers elkaar kunnen kruisen en het maken van een goede verbinding mogelijk blijft. Met een HEA 200 wordt dit bemoeilijkt vanwege de beperkte hoogte van het profiel.

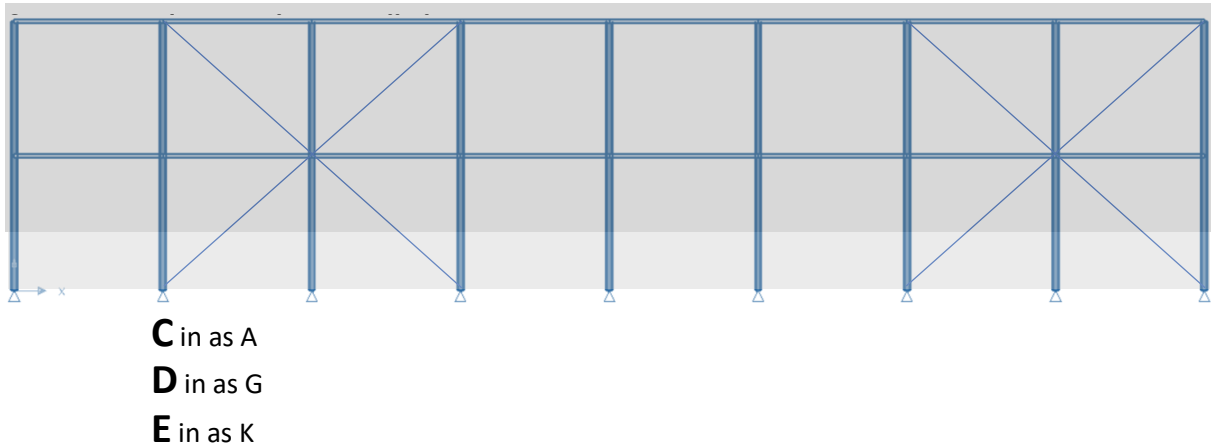
Resumé wat betreft de kolommen: (1) HEA 220 (S235), (2) HEA 240 (S355), (3) HEA 240 (S355), (4) HEA 240 (S355), (5) HEA 220 (S355), (6) HEA 220 (S355), (7) HEA 220 (S235), (8) HEA 240 (S355), (9) HEA 220 (S355), (10) HEA 240 (S355) en (11) HEA 220 (S235). Resumé wat betreft de liggers: (1-7, werkplaats) HEA 220 (S235) en (7-11, opslaghal) HEA 220 (S235).

Resultaten uit de sterkte toets bij de maatgevende kolommen bij wind:

- › Kolommen 1 & 11 = HEA 220 (S235): 35%, dus voldoet;
- › Kolommen 2, 3, 4, 8 en 10 = HEA 240 (S355): 54%, dus voldoet;
- › Kolommen 5, 6, 7 & 9 = HEA 220 (S355): 57%, dus voldoet;
- › Liggers stramien 1-7 (werkplaats) = HEA 220 (S235): 11%, dus voldoet;
- › Liggers stramien 7-11 (opslaghal) = HEA 220 (S235): 8%, dus voldoet.

Resultaten uit de stabiliteitstoets bij de maatgevende kolommen bij wind:

- › Kolommen 1 & 11 = HEA 220 (S235): 51%, dus voldoet;
- › Kolommen 2, 3, 4, 8 en 10 = HEA 240 (S355): 85%, dus voldoet;
- › Kolommen 5, 6, 7 & 9 = HEA 220 (S355): 83%, dus voldoet;
- › Liggers stramien 1-7 (werkplaats) = HEA 220 (S235): 77%, dus voldoet;
- › Liggers stramien 7-11 (opslaghal) = HEA 220 (S235): 46%, dus voldoet.



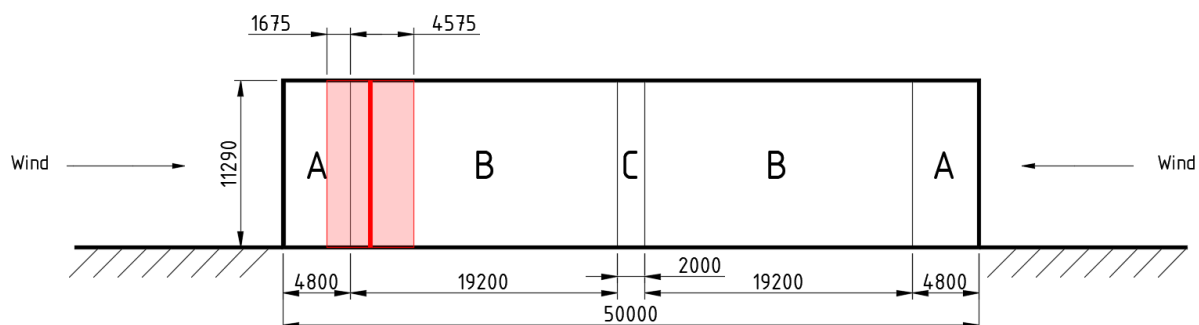
Figuur 19: Extra belaste portaalkolommen in het linker zijaanzicht van de industriehal.

Kolom C wordt belast met:

- › Drukkracht als gevolg van het afdragen van windbelasting vanuit windligger C; [85,8 kN inclusief partiële factor van 1,50 voor wind, dus 57,2 kN zonder partiële factor van 1,50 voor wind]
- › Windzuiging als gevolg van wind langs de langsgevels; [wordt hieronder bepaald]
- › Gewicht van de vakwerkligger, dakbekleding (buitenafwerking, isolatielaag, profielplaat, zonnepanelen, wind achter borstweringen, e.d.); [16,1 kN voor eigengewicht, 39,2 kN voor permanente belastingen (55,3 kN in totaal zonder partiële factor van 1,20) en 49,1 kN voor wind (zonder partiële factor van 1,50)]
- › Gewicht van de zonnepanelen; [27,3 kN zonder partiële factor van 1,50 voor nuttige daklasten]
- › Gewicht van de gevelbekleding (profielplaat, isolatielaag, profielplaat binnendoos, leidingen, e.d.); [0,40 kN/m² ofwel 2,49 kN/m voor 6,25 m stramienafstand zonder partiële factor van 1,20 voor permanente belastingen]

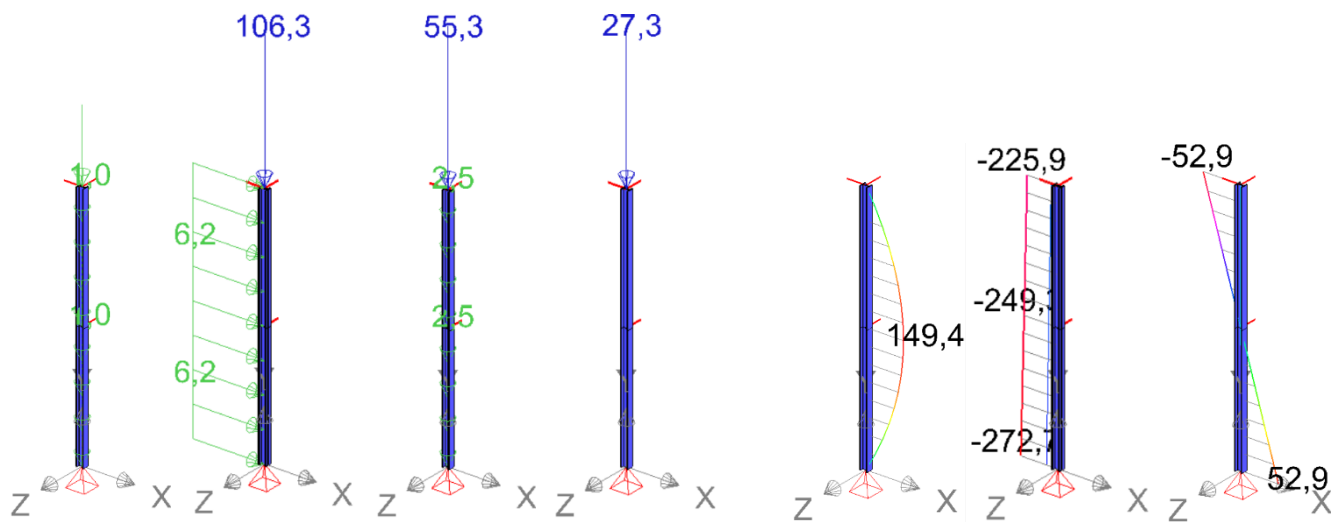
Zoals bekend hebben de langsgevels verschillende windzones, waarbij windzone A de grootste windzuiging geeft van -1,26 kN/m² en waarbij windzone B de één na grootste windzuiging geeft van -0,90 kN/m². De kolom wordt derhalve belast met:

$$q_w = (1,68 \cdot -1,26) + (4,58 \cdot -0,90) = -6,24 \text{ kN/m}$$



Figuur 20: Windzones van de langsgevel. Het rode gebied geeft aan hoe de zwaarst belaste portaalkolom wordt belast met windzuiging.

Het rekenmodel van deze kolom is te zien in onderstaande figuur 21.



Figuur 21: Portaalkolom C geschematiseerd in Diamonds BuildSoft. Er zijn verschillende belastinggevallen te zien: eigengewicht, windbelasting, permanente belasting en nuttige daklasten.

Uit de sterkte toets van een HEA 320 (S355) op buiging om de y-y-as blijkt dat de doorsnede voor 26% wordt belast, en in combinatie met normaalkracht wordt de doorsnede eveneens belast voor 26%. Dat dit correct is kan eenvoudig worden aangetoond:

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1630 \cdot 10^3 \cdot 355}{1,0} = 578,65 \text{ kNm}$$

De toets is dan:

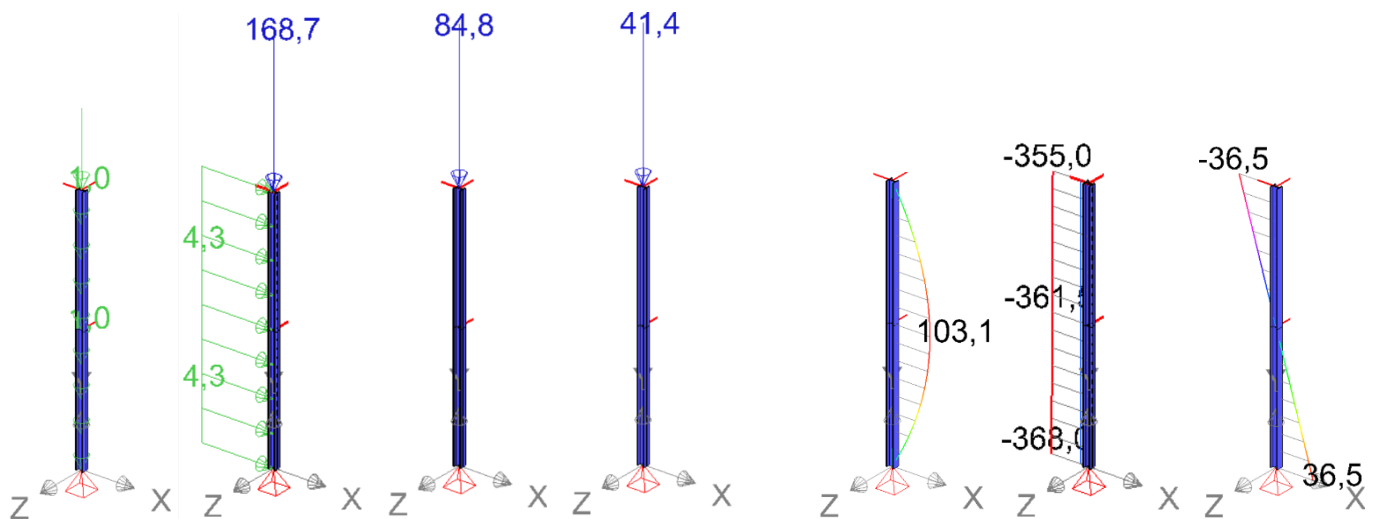
$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{149,4}{578,65} = 0,26 \leq 1,0$$

Verder blijkt dat een HEA 320 (S355) met 70% zorgt voor voldoende stabiliteit, zo blijkt uit de stabiliteitstoets. Dit is de eenheidscontrole bij de combinatie van kip- en knikstabiliteit. Een HEA 320 in staal-soort S355 voldoet aan alle voorwaarden. De HEA 280 (S235) bepaald in *Paragraaf 4.6.1 Kolom A (linker buitenkolom)* moet dus plaatselijk worden aangepast naar een HEA 320 (S355).

Kolom D wordt belast met:

- › Drukkracht als gevolg van het afdragen van windbelasting vanuit windligger C; [141,5 kN inclusief partiële factor van 1,50 voor wind, dus 94,4 kN zonder partiële factor van 1,50 voor wind]
- › Winddruk als gevolg van wind in de binnenruimtes; [4,3 kN/m zonder partiële factor van 1,50 voor wind]
- › Gewicht van de zonnepanelen; [41,4 kN zonder partiële factor van 1,50 voor nuttige daklasten]
- › Gewicht van de vakwerkligger, IPE 550, dakbekleding (buitenafwerking, isolatielaag, profielplaat, zonnepanelen, wind achter borstweringen, e.d.); [25,4 kN voor eigengewicht, 59,4 kN voor permanente belastingen (84,8 kN in totaal zonder partiële factor van 1,20) en 74,4 kN voor wind (zonder partiële factor van 1,50)]

Het rekenmodel van deze kolom is te zien in onderstaande figuur 22.



Figuur 22: Portaalkolom D geschematiseerd in Diamonds BuildSoft. Er zijn verschillende belastinggevallen te zien: eigengewicht, windbelasting, permanente belasting en nuttige daklasten.

Uit de sterkte toets van een HEA 320 (S355) op buiging om de y-y-as blijkt dat de doorsnede voor 29% wordt belast, en in combinatie met normaalkracht wordt de doorsnede eveneens belast voor 29%.

Dat dit correct is kan eenvoudig worden aangetoond:

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1630 \cdot 10^3 \cdot 355}{1,0} = 578,65 \text{ kNm}$$

De toets is dan:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{103,1}{578,65} = 0,18 \leq 1,0$$

Verder blijkt dat een HEA 320 (S355) met 76% zorgt voor voldoende stabiliteit, zo blijkt uit de stabiliteitstoets. Dit is de eenheidscontrole bij de combinatie van kip- en knikstabiliteit. Een HEA 320 in staal-soort S355 voldoet aan alle voorwaarden. De HEA 280 (S235) bepaald in *Paragraaf 4.6.3 Kolom C (mid-denkolom)* moet dus plaatselijk worden aangepast naar een HEA 320 (S355).

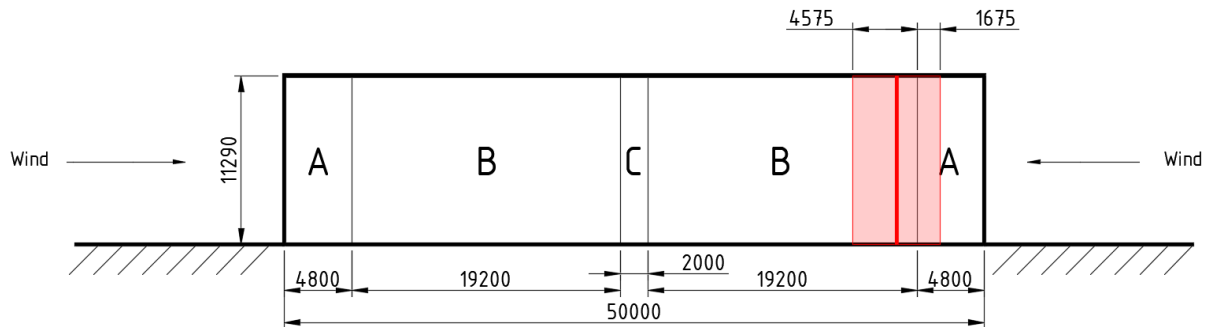
Kolom E wordt belast met:

- › Drukkracht als gevolg van het afdragen van windbelasting vanuit windligger C; [40,4 kN inclusief partiële factor van 1,50 voor wind, dus 26,9 kN zonder partiële factor van 1,50 voor wind]
- › Windzuiging als gevolg van wind langs de langsgevels; [wordt hieronder bepaald]
- › Gewicht van de vakwerkligger, dakbekleding (buitenafwerking, isolatielaag, profielplaat, zonnepanelen, wind achter borstweringen, e.d.); [9,3 kN voor eigengewicht, 20,2 kN voor permanente belastingen (29,5 kN in totaal zonder partiële factor van 1,20) en 25,3 kN voor wind (zonder partiële factor van 1,50)]
- › Gewicht van de zonnepanelen; [14,1 kN zonder partiële factor van 1,50 voor nuttige daklasten]

- › Gewicht van de gevelbekleding (profielplaat, isolatielaag, profielplaat binnendoos, leidingen, e.d.); [0,40 kN/m² ofwel 2,49 kN/m voor 6,25 m stramienafstand zonder partiële factor van 1,20 voor permanente belastingen]

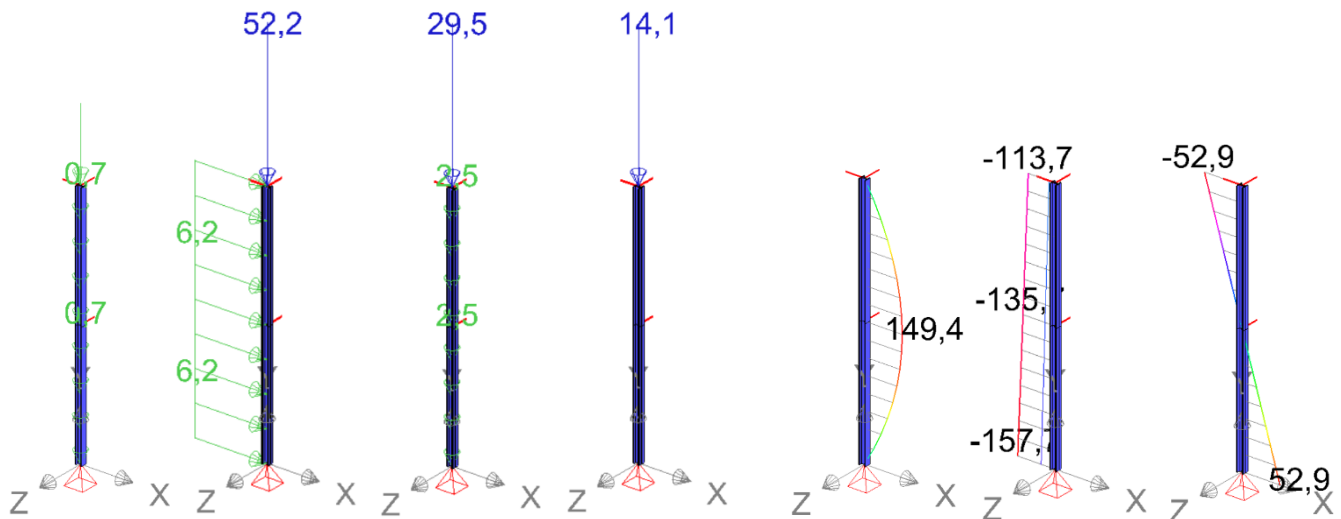
Zoals bekend hebben de langsgevels verschillende windzones, waarbij windzone A de grootste windzuiging geeft van -1,26 kN/m² en waarbij windzone B de één na grootste windzuiging geeft van -0,90 kN/m². De kolom wordt derhalve belast met:

$$q_w = (1,68 \cdot -1,26) + (4,58 \cdot -0,90) = -6,24 \text{ kN/m}$$



Figuur 23: Windzones van de langsgevel. Het rode gebied geeft aan hoe de zwaarst belaste portaalkolom wordt belast met windzuiging.

Het rekenmodel van deze kolom is te zien in onderstaande figuur 24.



Figuur 24: Portaalkolom E geschematiseerd in Diamonds BuildSoft. Er zijn verschillende belastinggevallen te zien: eigengewicht, windbelasting, permanente belasting en nuttige daklasten.

Uit de sterkte toets van een HEA 280 (S355) op buiging om de y-y-as blijkt dat de doorsnede voor 42% wordt belast, en in combinatie met normaalkracht wordt de doorsnede belast voor 45%.

Dat dit correct is kan eenvoudig worden aangetoond:

$$M_{c,Rd} = M_{el,Rd} = \frac{W_{el,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1010 \cdot 10^3 \cdot 355}{1,0} = 358,55 \text{ kNm}$$

De toets is dan:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{149,4}{358,55} = 0,42 \leq 1,0$$

Verder blijkt dat een HEA 280 (S355) met 84% zorgt voor voldoende stabiliteit, zo blijkt uit de stabiliteitstoets. Dit is de eenheidscontrole bij de combinatie van kip- en knikstabiliteit. Een HEA 280 in staal-soort S355 voldoet aan alle voorwaarden. De HEA 280 (S235) bepaald in *Paragraaf 4.6.2 Kolom B (rechter buitenkolom)* moet dus plaatselijk worden aangepast naar een HEA 280 (S355).

§ 4.9 Drukstaven

De grootste efficiëntie is inmiddels behaald uit al het staal van de industriehal. Het enige wat nog mist zijn de drukstaven tussen de kolommen van de gevels. Nog belangrijk is misschien wel dat de drukstaven in het dakvlak missen; deze spelen een essentiële rol als onderdeel van de windliggers. Deze fungeren als kipsteunen voor alle kolommen. Voor de eenvoud van de berekening wordt aangenomen dat in alle langsgevels (inclusief scheidingswand bij het middensteunpunt) hetzelfde buisprofiel wordt gebruikt als drukstaaf. Hetzelfde wordt gedaan voor de kopgevels. Op basis van de cumulatieve kipsteunwerking worden drukkrachten berekend, waarbij een buisprofiel wordt getoetst.

§ 4.9.1 Drukstaven in de langsgevels en scheidingswand

Het komt niet geheel als een verrassing dat de kolommen in het midden van het portaal het zwaarste worden belast; hier treden dan ook de grootste spanningen op in de flenzen van de HEA-profielen.

De maatgevende drukkrachten worden berekend aan de hand van onderstaande formule:

$$\text{HEA 220: } N_{st,Ed} = 0,005 \cdot A_f \cdot f_y = 0,005 \cdot (11 \cdot 220) \cdot 355 = 4295,50 \text{ N} \cong 4,30 \text{ kN}$$

$$\text{HEA 280: } N_{st,Ed} = 0,005 \cdot A_f \cdot f_y = 0,005 \cdot (13 \cdot 280) \cdot 235 = 4277,00 \text{ N} \cong 4,28 \text{ kN}$$

$$\text{HEA 320: } N_{st,Ed} = 0,005 \cdot A_f \cdot f_y = 0,005 \cdot (15,5 \cdot 300) \cdot 235 = 8253,75 \text{ N} \cong 8,25 \text{ kN}$$

$$\text{In totaal worden de drukstaven belast met: } N_{st,Ed} = (2 \cdot 4,30) + (4 \cdot 4,28) + (3 \cdot 8,25) = 50,46 \text{ kN}$$

Door deze drukkracht als permanente belasting in te voeren in het model in Diamonds BuildSoft blijkt:

- › Sterktecontrole: $0,15 \leq 1,0$ **CHS 114.3x4.0** voldoet aan de voorwaarde.
- › Stabiliteitscontrole: $0,69 \leq 1,0$ **CHS 114.3x4.0** voldoet aan de voorwaarde.

Alle buisprofielen worden toegepast in staalsoort S235.

§ 4.9.2 Drukstaven in de kopgevels

Op dezelfde manier worden de profielen van de drukstaven in de kopgevels bepaald. De maatgevende drukkrachten worden berekend aan de hand van onderstaande formule:

$$\text{HEA 220: } N_{st,Ed} = 0,005 \cdot A_f \cdot f_y = 0,005 \cdot (11 \cdot 220) \cdot 355 = 5112,00 \text{ N} \cong 5,11 \text{ kN}$$

$$\text{HEA 240: } N_{st,Ed} = 0,005 \cdot A_f \cdot f_y = 0,005 \cdot (12 \cdot 240) \cdot 355 = 4295,50 \text{ N} \cong 4,30 \text{ kN}$$

$$\text{In totaal worden de drukstaven belast met: } N_{st,Ed} = (5 \cdot 5,11) + (3 \cdot 4,30) = 38,45 \text{ kN}$$

Door deze drukkracht als permanente belasting in te voeren in het model in Diamonds BuildSoft blijkt:

- › Sterktecontrole: $0,12 \leq 1,0$ **CHS 88.9x5.0** voldoet aan de voorwaarde.
- › Stabiliteitscontrole: $0,79 \leq 1,0$ **CHS 88.9x5.0** voldoet aan de voorwaarde.

Alle buisprofielen worden toegepast in staalsoort S235.

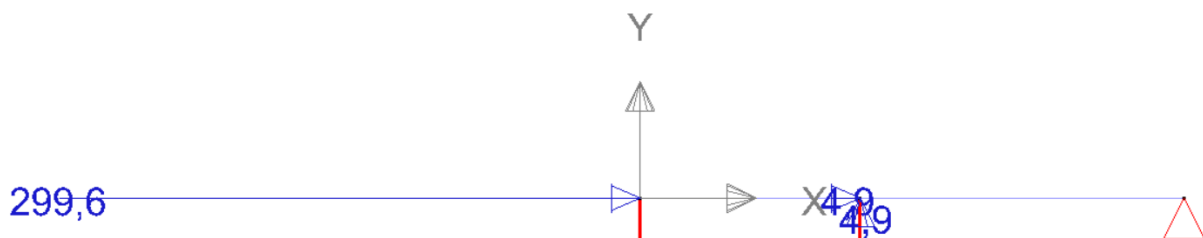
§ 4.9.3 Drukstaven t.p.v. windligger A en de vakwerkligger

Aan kipstabiliteit is voldaan indien zijdelingse steunen (kipsteunen) aan de onderrandstaven zijn gedi-mensioneerd op de grootste van de volgende krachten:

$$N_{st,Ed} = 0,01 \cdot A_f \cdot \sigma_{f,Ed} = 0,01 \cdot 3142 \cdot 154,9 = 4867,95 \text{ N} \cong 4,87 \text{ kN}$$

$$N_{st,Ed} = 0,005 \cdot A_f \cdot f_y = 0,005 \cdot 3142 \cdot 235 = 3691,85 \text{ N} \cong 3,69 \text{ kN}$$

In het dak treedt een maximale drukkracht op in de drukstaaf ten gevolge van windbelasting van 299,6 kN. De kipsteun vangt een horizontale kracht van -4,87 kN op om verplaatsing van de onderrandstaaf te voorkomen. Omdat de kipsteun onder een hoek van 45° een verbinding vormt tussen de onderrand van de vakwerkligger en de drukstaaf in het dakvlak, is de drukkracht in de kipsteun gelijk aan 6,89 kN. In de drukstaaf kan deze kracht worden ontbonden tot een normaalkracht van -4,87 kN en een dwarskracht van 4,87 kN. De maximale drukkracht in de drukstaaf is daardoor 304,4 kN. Het gaat in totaal om zeven vakwerkliggers, dus cumulatief gezien treedt een drukkracht op van maximaal 34,08 kN. Dat is minder dan de maximale drukkracht ten gevolge van windbelasting, dus is dit niet maatgevend.



Figuur 25: Het rekenschema van de maatgevende drukstaaf in het dakvlak.

Door deze drukkracht als permanente belasting in te voeren in het model in Diamonds BuildSoft blijkt:

- › Sterktecontrole: $0,49 \leq 1,0$ **CHS 88.9x4.0** voldoet aan de voorwaarde.
- › Stabiliteitscontrole: $0,79 \leq 1,0$ **CHS 88.9x4.0** voldoet aan de voorwaarde.

Alle buisprofielen worden toegepast in staalsoort S235.

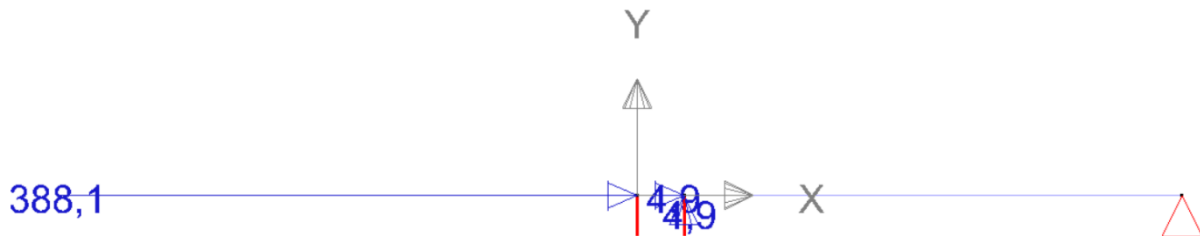
§ 4.9.4 Drukstaven t.p.v. windligger B en IPE550

Aan kipstabiliteit is voldaan indien zijdelingse steunen (kipsteunen) aan de onderflens zijn gedimensi-oneerd op de grootste van de volgende krachten:

$$N_{st,Ed} = 0,01 \cdot A_f \cdot \sigma_{f,Ed} = 0,01 \cdot 3612 \cdot 137,0 = 4947,06 \text{ N} \cong 4,95 \text{ kN}$$

$$N_{st,Ed} = 0,005 \cdot A_f \cdot f_y = 0,005 \cdot 3612 \cdot 235 = 4244,10 \text{ N} \cong 4,24 \text{ kN}$$

In het dak treedt een maximale drukkracht op in de drukstaaf ten gevolge van windbelasting van 388,1 kN. De kipsteun vangt een horizontale kracht van -4,95 kN op om verplaatsing van de onderrandstaaf te voorkomen. Omdat de kipsteun onder een hoek van 45° een verbinding vormt tussen de onderflens van de IPE 550 en de drukstaaf in het dakvlak, is de drukkracht in de kipsteun gelijk aan 7,00 kN. In de drukstaaf kan deze kracht worden ontbonden tot een normaalkracht van -4,95 kN en een dwarskracht van 4,95 kN. De maximale drukkracht in de drukstaaf is daardoor 393,1 kN. Het gaat in totaal om zeven vakwerkliggers, dus cumulatief gezien treedt een drukkracht op van maximaal 34,6 kN. Dat is minder dan de maximale drukkracht ten gevolge van windbelasting, dus is dit niet maatgevend.



Figuur 26: Het rekenschema van de maatgevende drukstaaf in het dakvlak.

Door deze drukkracht als permanente belasting in te voeren in het model in Diamonds BuildSoft blijkt:

- › Sterktecontrole: $0,44 \leq 1,0$ **CHS 159x8.0** voldoet aan de voorwaarde.
- › Stabiliteitscontrole: $0,77 \leq 1,0$ **CHS 159x8.0** voldoet aan de voorwaarde.

Alle buisprofielen worden toegepast in staalsoort S235.

§ 4.10 Bout- en lasverbindingen

In de hele industriehal worden vele verbindingen gemaakt met bouten of lasnaden. De volgende verbindingen worden berekend in *Bijlage X: Bout- en lasverbindingen* van het Bijlagenboek:

- › Boutverbinding vakwerkligger-kolom;
- › Boutverbinding in de bovenrandstaaf van de vakwerkligger;
- › Boutverbinding in de onderrandstaaf van de vakwerkligger;
- › Kolomvoetplaatverbinding.

In *Paragraaf 4.6 Kolommen* en *Bijlage T: Windliggers en windbokken* zijn de windverbanden berekend. Hierbij is al rekening gehouden met de configuratie van de boutverbindingen. De berekende kolomvoetplaatverbinding wordt onder alle kolommen toegepast.

5. Conclusie

Het doel van dit eindwerk is het maken van een eerste constructieontwerp van een industriehal voor een firma te Hulst. De grootste overspanning (35,00 m) kan met verschillende liggers worden overspannen; vakwerkliggers, raatliggers en plaatliggers. Deze drie liggervarianten worden volledig gediensioneerd, waarna, door middel van een variantenstudie met multicriteria-analyse (MCA), de meest geschikte variant wordt gekozen die past bij de gestelde efficiëntiedoelstelling. De onderzoeksvraag luidde daarom als volgt: *Hoe ziet het meest geschikte en kostenefficiënte ontwerp van de stalen bovenbouwconstructie eruit voor de industriehal van een firma te Hulst, met inachtneming van alle randvoorwaarden en geldende eisen?*

Om deze onderzoeksvraag goed te kunnen beantwoorden zijn 9 deelvragen geformuleerd:

› *Deelvraag 1: Wat zijn de voorwaarden bij het bepalen van het stramienplan?*

Een stramienplan is een horizontaal of verticaal vlak waarlangs of waartegen de verschillende delen van de staalconstructie worden geplaatst. Een stramienplan vormt dus de solide basis voor het basisontwerp en daarmee ook de grootte van de belastingen op de liggers en kolommen; grotere stramienafstanden betekent minder portalen, kolommen en/of liggers, maar betekent wel dat deze constructiedelen zwaarder belast zullen worden en dus grotere profielen aangemeten zullen krijgen. Bij kleinere stramienafstanden gebeurt logischerwijs exact het tegenovergestelde. Belastingen kunnen een argument zijn om te kiezen voor grotere of kleinere stramienafstanden.

Andere algemene voorwaarden bij het bepalen van het stramienplan zijn het type en de opbouw van het dak- en gevelsysteem. Een stramienplan wordt in eerste instantie bepaald door de opbouw van het daksysteem. Er bestaan diverse systemen: koud dak, omgekeerd dak en warm dak. Er is gekozen voor een warm dak vanwege de bescherming die de opbouw biedt tegen condensatie en/of vochttransport en daarmee ook rotting weet te voorkomen. Verder biedt de dakhuid bescherming tegen allerlei andere invloeden, waardoor de isolatie geen verdere risico's loopt. Het feit dat de isolatie droog blijft, in tegenstelling tot andere daksystemen, betekent dat de isolatiewaarde van het materiaal behouden blijft. Verder is een warm dak minder gevoelig voor temperatuurschommelingen. De opbouw van het dak bepaalt het gewicht van het dak en daarmee ook de zwaarte van de geprofileerde plaat. Er is gekozen voor isolatiemateriaal met het laagste eigengewicht: drukvaste PIR-panelen met een dikte van 150 mm. De geprofileerde plaat moet in staat zijn een stramienafstand te overspannen in een enkelveld- of een meerveldsconfiguratie, maar mag ook niet te veel van de beschikbare hoogte in beslag nemen om zo het staalwerk voldoende ruimte te kunnen garanderen. Zo is in combinatie met windzuiging op platte daken gekozen voor een trapeziumvormig profiel; de SAB 106R+/750. Een afstand van 6,25 m is daarmee haalbaar, dus deze afstand is vastgesteld.

Een stramienplan wordt in tweede instantie pas bepaald door de opbouw van het gevelsysteem. Wat betreft het binnendoorsysteem in de gevels: deze gevels met glaswolisolatie zijn beter brandwerend dan sandwichpanelen en hebben als bijkomstig voordeel de grote keuzevrijheid uit buitenbeplating. De dikte van de glaswolisolatie bepaalt het profiel van het binnendoorsysteem; voor een dikte van 200 mm moet een SAB B140/600 profiel worden gebruikt. Onder invloed van winddruk en -zuiging

zijn overspanningen van 6,25 m, zoals eerst vastgesteld in het dak, haalbaar. In de kopgevels zijn de uiteindelijke overspanningen kleiner, namelijk 5,83 m en 4,50 m.

Het moge duidelijk zijn dat opbouw van de buitenhuid een bepalende rol speelt in de grootte van de stramienafstanden. Er zijn ook andere redenen te bedenken waarom een afstand moet worden aangepast, zoals het gebruik van bepaalde vloertypen. De overspanning van een bijvoorbeeld een kanaalplaatvloer is niet ongelimiteerd, dus dit kan ook bepalend zijn bij het vaststellen van een stramienplan.

› *Deelvraag 2: Welke belastingen treden er op?*

Met het stramienplan als basis kunnen de verdeelde oppervlaktelasten worden omgerekend tot verdeelde lijnlasten. De constructie wordt belast met vier lastgroepen: eigengewicht, permanente last, nuttige last (H: Daken), wind en/of sneeuw. Het eigengewicht is het gewicht van de staalconstructie, de permanente last is het gewicht van de dak- en gevelconstructie, de nuttige last (H: Daken) is de belasting ten gevolge van wind en/of sneeuw. Regenwater wordt niet meegenomen als lastgroep, omdat er voldoende reguliere en noodafvoeren worden aangebracht, zodat de belasting van het water altijd minder is dan de sneeuwbelasting van $0,56 \text{ kN/m}^2$. Wat betreft de sneeuw ontstaan ophopingen achter de borstweringen met een maximale belasting van $0,90 \text{ kN/m}^2$ over een strijklengte van 5,00 m. De belasting van wind bestaat uit verschillende windzones op de gevels en het dak. Deze belastingen zijn bepaald aan de hand van de handberekeningen en de geautomatiseerde functies in Diamonds BuildSoft. BuildSoft hield hier geen rekening met de borstweringen als dakrand, wat invloed heeft in de windzuiging in de windzone achter de dakrand. Verder kwamen alle windbelastingen overeen.

De dakconstructie bestaat uit bitumen als buitenafwerking ($0,05 \text{ kN/m}^2$), drukvaste PIR-isolatiepanelen met een dikte van 150 mm ($0,045 \text{ kN/m}^2$), een binnenplaat SAB 106R+/750 ($0,16 \text{ kN/m}^2$) en extra belastingen voor eventuele leidingen/installaties, etc. ($0,10 \text{ kN/m}^2$). De onderliggende constructie wordt belast met een verdeelde permanente oppervlaktelast van $0,36 \text{ kN/m}^2$ en een nuttige last van $0,25 \text{ kN/m}^2$ voor zonnepanelen. De wind- en sneeuwbelastingen worden niet gecombineerd. Daarom worden meerdere rekenmodellen gemaakt: windbelasting met zonnepanelen, windbelasting zonder zonnepanelen en sneeuwbelasting met zonnepanelen. Uit het rekenmodel met windbelasting maar zonder zonnepanelen blijkt dat de opwaartse druk van de wind niet voldoende is om het dak en de staalconstructie omhoog te drukken. Er treedt dus geen drukkracht op in de onderflens van een raatligger of plaatligger en geen drukkracht in de onderrandstaaf van de vakwerkliggers.

De afstand tussen de portalen is 6,25 m, dus door de verdeelde oppervlakte lasten met deze afstand te vermenigvuldigen worden de volgende verdeelde lijnlasten gevonden: $2,24 \text{ kN/m}^2$ voor permanente lasten en $1,56 \text{ kN/m}^2$ voor nuttige lasten.

- › *Deelvraag 3: Welke overspanningsconstructie is constructief en kostentechnische gezien het beste geschikt om de werkplaats te overspannen? En welke is het beste geschikt om de opslaghal te overspannen?*

Om deze deelvraag goed te kunnen beantwoorden is allereerst onderzoek gedaan naar meerdere vakwerkliggers, raatliggers en plaatliggers. Vakwerkliggers bestaan in velen soorten en maten, waardoor in eerste instantie een selectie is gemaakt van drie vakwerkliggerontwerpen; Warren vakwerk, Pratt vakwerk en Howe vakwerk. Om de vergelijking zuiver te houden zijn voorafgaand aan de analyse een aantal uitgangspunten vastgesteld met betrekking tot het precieze ontwerp (hoogte met behulp van de literatuur en aantal velden), de staalkwaliteit en het profieltype (volledig in SHS-kokerprofielen). Uit deze analyse blijkt dat de Howe vakwerkligger in theorie 28 kg meer weegt ten aanzien van de Warren vakwerkligger. De Warren vakwerkligger weegt echter weer 14 kg meer dan de Pratt vakwerkligger. De Pratt vakwerkligger is met een totaalgewicht van 2608 kg relatief gezien dus het lichtste.

Een vakwerkligger met SHS-kokerprofielen is lastig te verbinden met HEA-kolommen. Het is makkelijker om HEA-profielen te verbinden. Daarnaast is standaard balkstaal goedkoper dan kokerprofielen, al verschilt dit per staalleverancier en het verloop van de staalprijsindex. In de regel is balkstaal de helft goedkoper dan een kokers. Dit brengt ons tot de eerste optimalisatie, waarbij de boven- en onder-randstaven respectievelijk worden vervangen voor HEA 220 en HEA 140 in staalsoort S235. Uit een tweede optimalisatie blijkt dat er geen voordeel wordt behaald met staalsoort S355. De definitieve en best maakbare vakwerkligger is dus een Pratt vakwerkligger met 12 velden, waarbij de bovenrandstaven bestaan uit HEA 220 (S235), de onderrandstaven bestaan uit HEA 140 (S235), de diagonalen bestaan uit SHS 70x70x5 (S275) en ten slotte de verticalen bestaan uit SHS 70x70x4 (S275).

Voor de raatliggers is in eerste instantie gekeken naar een IPE 600 (S355) en HEA 800 (S355) vermaakt tot standaardraatliggers. De IPE 600 voldeed niet aan doorbuiging, waardoor meteen al duidelijk was dat een HEA-profiel moest worden gebruikt. De HEA 800 voldeed niet aan de stabiliteitseis, waarbij langs de overspanning zeven kipsteunen mogen worden gebruikt. Door dit hetzelfde te houden is het vergelijk met de vakwerkligger eerlijker. Als laatste is gekozen voor een HEA 900 standaardraatligger met aan de onderflens een UNP 400 (S355). Dit samengestelde profiel voldeed aan alle eisen voor sterkte en stabiliteit.

Voor de plaatliggers is de raatligger als uitgangspunt genomen. De hoogte van de plaatligger is medebepaald aan de hand van de bestaande literatuur. Plaatliggers staan bekend om de dunne lijven, dus op basis van verkregen inzichten is een dikte aangenomen van 8 mm. Als lijf worden 1200x8 mm platen gebruikt. Voor de flenzen worden standaard strippen gebruikt: 300x30 mm. Deze flenzen hebben dezelfde afmetingen als bij de HEA 900 raatligger. Deze plaatligger in staalsoort S355 voldeed niet aan stabiliteit, waardoor ook hier is gekozen voor een UNP 400 (S355) aan de onderflens. Hierdoor voldeed het profiel aan alle eisen voor sterkte en stabiliteit.

Op basis van deze drie liggertypen is een calculatie gemaakt waarin de kosten zijn meegenomen voor materiaal, transport, conservering en fabricage. Hieruit blijkt dat de vakwerkligger met een kostprijs

van 19.500,00 EUR de meest kostenefficiënte ligger is. Een raatligger kost naar verwachting 44.500,00 EUR en een plaatligger kost naar verwachting 36.250,00 EUR. Een bijkomstig voordeel is het gewicht van de vakwerkligger. Een zware ligger moet namelijk ondersteund worden met zwaardere kolommen en dus ook met meer heipalen of zwaardere heipalen. Uit de calculatie blijkt dat de vakwerkligger 3.650 kg zal wegen, dat de plaatligger 11.100 kg zal wegen en dat de raatligger 13.100 kg zal wegen. Het aantal tonnen staal ligt bij een vakwerkligger dus 62% lager dan het gewicht van een raatligger en 51% lager dan het gewicht van de plaatligger. Dit maakt de keuze voor een vakwerkligger des te evident. Het enige grote nadeel van een vakwerkligger is de hoeveelheid zaag en laswerk die ermee gemoeid is.

In de keuze voor een liggertype gaat het lang niet altijd om alleen de kosten en het eigengewicht. In de afweging kan ook worden gekeken naar montage, veerkrachtigheid, flexibiliteit en vormgeving. In de daken van industriehallen worden vaak leidingen verwerkt die door de liggers worden gevoerd. Bij een plaatligger moeten gaten worden gesneden in het lijf of moeten koppelingen gemaakt worden aan de onderflens. Bij een raatligger en een vakwerkligger heb je dit probleem niet. Om deze criteria te kunnen toetsen is een variantenstudie gemaakt op basis van een multicriteria-analyse (MCA). Daaruit blijkt met grote overtuiging dat de vakwerkligger het hoogste en dus het beste scoort; een score van +1,80 voor de vakwerkligger, -1,05 voor de raatligger en -0,40 voor de plaatligger.

In de opslaghal is gekozen voor een overspanningsconstructie met standaardliggers, mits dit mogelijk was. Daarvan bleek dat een IPE 550 in staalsoort S235 voldoende was om deze 18,00 m te overspannen. De keuze voor een standaard I-profiel is het beperken van het aantal bewerkingen, zodat kosten worden uitgespaard. Deze overspanningen lenen zich uitstekend om raatliggers toe te passen, maar omwille van het aantal kipsteunen, om de stabiliteit van de ligger te garanderen, is hier niet voor gekozen.

› *Deelvraag 4: Hoe ziet de efficiëntere configuratie van windliggers en windbokken eruit?*

Om deze vraag te beantwoorden is in eerste instantie onderzoek gedaan naar een configuratie met vier windliggers en per gevel twee windbokken (ook in de scheidingspunt bij het middensteunpunt). Door een configuratie aan te nemen van de windbokken, waarbij de kruizen over één stramienveld lopen (6,25 m, 5,83 m of 4,50 m breed, dus kruizen in de windbokken worden gestapeld, met een hoek van 45° als streven), lopen de staafkrachten enorm op. Dit betekent dat de kolommen door grote drukkrachten plaatselijk enorm moeten worden verzwakt. De grote trekkrachten moeten ook weer worden opgevangen door de fundering, dus er moeten lokaal zwaardere ankers worden toegepast en zwaardere heipalen. Als aanpassing is gekozen voor grote kruizen die over twee stramienvelden lopen. Zo worden de trekkrachten in de diagonalen en de drukkrachten in de kolommen gehalveerd. Zodoende zijn slankere profielen mogelijk. Ook betekent dit dat de kolomvoetplaatverbinding minder zware ankers nodig heeft en dat er minder zware heipalen nodig zijn. De configuratie is te zien in figuren 4, 5 en 6 van *Paragraaf 4.7 Windverbanden*.

Kleinere profielen laten voldoende ruimte om verbindingen te maken met koppelplaten met M16 bouten. Een HEA 220 als bovenrandstaaf van de vakwerkligger en als ligger in de kopgevels heeft een beperkte hoogte, dus het minimaliseren van profielgrootte van de drukstaven is belangrijk. Wat betreft de windliggers was een vergelijkbare verbetering met grotere kruizen ook mogelijk geweest, zodat de drukstaven minder belast worden en er zo kleinere profielen mogelijk zijn. Dit maakt het maken van een goede boutverbinding met de liggers eenvoudiger.

› *Deelvraag 5: Welke profielen zijn er nodig voor de kolommen, windverbanden en drukstaven?*

Voor de beantwoording van deze deelvraag is gebruik gemaakt van handberekeningen in combinatie met analyses in Diamonds BuildSoft. Daaruit blijkt dat voor alle kolommen in een portaal een HEA 280 (S235) nodig is. Bij de afdracht van wind treden extra drukkrachten op, waardoor de HEA 280 (S235) kolommen ter plaatse van de windbokken vervangen moeten worden voor een HEA 320 (S355). Hetzelfde principe kan worden toegepast op de kopgevels; een HEA 220 (S355) is het profiel dat overal in de kopgevel kan worden gebruikt, maar ter plaatse van de windbokken moeten deze vervangen worden voor een HEA 240 (S355). In de hoeken worden de kolommen het minste belast: minder vierkante meters dak en minder zware belasting ten gevolge van het eigengewicht van de staalconstructie, dus minder drukkracht en minder vierkante meters gevel, waardoor minder buiging optreedt ten gevolge van windlasten. Met een HEA 180 (S235) als hoekkolom kan worden volstaan. Aan de bovenzijde van de langsgevel worden HEA 160 profielen in S235 aangebracht (niet opgenomen in dit eindwerk) die aan het lijf van de hoekkolom worden gemonteerd. Met een HEA 180 (S235) is de ruimte daarvoor te beperkt, dus in de tekeningen is op alle hoeken van de industriehal gekozen voor een praktisch profiel; een HEA 220 (S235). Ook maakt de extra ruimte het vastdraaien van de bouten velen malen makkelijker.

Onder windverbanden wordt verstaan: windligger en windbokken. Om de omvang van de analyse te beperken zijn per windligger twee typen hoekstalen toegepast. Er zijn in het dakvlak van de industriehal drie verschillende windliggers aan te wijzen: A, B en C/D. In windligger A wordt gebruik gemaakt van een L 60x60x6 en een L 80x80x8, in windligger B wordt gebruikt gemaakt van een L 60x60x6 en een L 80x80x10. In eerste instantie werd gekozen voor een L 90x90x8, maar dit profiel neemt te veel ruimte in beslag, waardoor is gekozen voor een L 80x80x10. Verder zijn windliggers C en D dezelfde windligger en wordt gebruikt gemaakt van L 60x60x6, waarbij lokaal een L 70x70x7 wordt toegepast. Er zijn vijf verschillende windbokken aan te wijzen in de industriehal: A, B, C, D en E. In windbok A wordt gebruik gemaakt van een strip 80x15 mm, in windbok B een strip 100x15 mm, in windbok C een strip 80x10 mm, in windbok D een strip 100x15 mm en in windbok E wordt een strip 60x8 mm toegepast. In de gevels kunnen strippen worden toegepast, maar niet in het dakvlak; hoekstalen overspannen beter, strippen zullen sneller gaan 'uitzakken'.

› *Deelvraag 6: Hoe zien de bout- en lasverbindingen van de industriehal eruit?*

De sterkte van een constructie hangt niet alleen af van de staalprofielen, maar ook van de sterkte van de verbindingen, al dan niet met bouten of lassen. Voor zware staalconstructies, zoals deze industriehal, worden vrijwel altijd bouten toegepast van M16 of zwaarder. Zo blijkt ook uit de berekeningen;

de kleinste boutverbindingen bestaan uit twee M16 bouten in klasse 8.8 en de zwaarste boutverbindingen bestaan uit drie M20 bouten in klasse 8.8. Het exacte antwoord op deze deelvraag is lastig tekstueel uit te leggen en is na te zien in de figuren van *Bijlage T: Windliggers en windbokken* en *Bijlage X: Bout- en lasverbindingen* van het Bijlagenboek. Omdat hoekstalen niet-symmetrisch zijn aangesloten (slechts met één flens aangesloten) worden de afmetingen van de boutverbindingen bij hoekstalen hoofdzakelijk bepaald in NEN-EN 1993-1-8. In de regel is aangenomen dat de afstand tussen de bouten (steek) een vijfvoud is van de gatdiameters, zodat de grensweerstand mag worden berekend met een reductiefactor van 0,7. Dat is de hoogst mogelijke reductiefactor, zodat dergelijke verbindingen voldoen met het laagste aantal bouten.

› *Deelvraag 7: Wat zijn de benodigde afmetingen van de kolomvoetplaten?*

De kolomvoeten bestaan uit een voetplaat 330x350x10 mm. Deze is berekend op basis van de meest belastende situatie, waarbij de dikte van de voetplaat wordt bepaald door de grootste normaaldrukkracht en de dikte van de ankers wordt bepaald door de afschuifkracht. De voetplaat heeft minimaal een dikte nodig van 6,17 mm, maar er is gekozen voor een standaard minimale dikte van 10 mm. Voor de ankers zijn vier M24 ankers nodig met een verankeringslengte van 758,12 mm. Het betreft een glad anker waardoor een haak verplicht is, dus de ankers zijn als volgt opgebouwd: 600 mm rechtstand – buiging – 160 mm haak. Een dergelijke kolomvoet is maatgevend en wordt toegepast onder alle kolommen.

› *Deelvraag 8: Hoeveel kost de meest efficiënte ligger voor de overspanning van 35,00 m?*

Om deze vraag te kunnen beantwoorden wordt gebruik gemaakt van een calculatie. Hieruit blijkt dat de meest efficiënte ligger voor de overspanning van 35,00 m de vakwerkligger is met een kostprijs van 19.500,00 EUR. Een raatligger kost naar verwachting 44.500,00 EUR en een plaatligger kost naar verwachting 36.250,00 EUR. De vakwerkligger is dus het goedkoopste, wat betekent dat deze het beste uit de test komt. Een bijkomstig voordeel is dat het aantal tonnen staal 62% lager ligt dan het gewicht van een raatligger en 51% lager dan bij de plaatligger. Teruggrijpend op het stroomdiagram in de methode, zorgt een lager eigengewicht van de liggerconstructie ervoor dat er slankere kolommen kunnen worden toegepast. Het gewicht van het staalwerk neemt in algemene zin af, waardoor minder zware funderingspalen nodig zijn of juist minder funderingspalen. Daarmee worden kosten uitgespaard.

› *Deelvraag 9: Welke toevoegingen en aanpassingen kan/moet ik doen om de constructie zo goed mogelijk op te bouwen?*

Deze deelvraag heel breed en hangt daardoor nauw samen met alle voorgaande deelvragen. Het maken van een staalconstructie is een langdurig proces waarbij op verscheidene momenten blijkt dat er verbeteringen nodig zijn aan het basisontwerp.

6. Discussie & aanbeveling

In dit hoofdstuk worden de betrouwbaarheid van de resultaten en de beperkingen van het eindproduct besproken. Terugkijkend zijn de onderstaande limitaties te noemen bij dit eindwerk.

- › Constructie en kostentechnisch gezien bleek de vakwerkligger de meest efficiënte overspanningsconstructie te zijn. Op de belangrijkste criteria (kostprijs en gewicht) wint de vakwerkligger het overduidelijk van de raatligger en de plaatligger. Echter, constructief gezien is er een voordeel te koppelen aan raatliggers en plaatliggers betreffende de hoogte van de ligger die niet van toepassing is op de vakwerkligger. In dit eindwerk is namelijk uitvoerig aangetoond dat een vakwerkligger een grotere hoogte heeft dan een raatligger of plaatligger. In dit geval heeft de opdrachtgever aangegeven dat de werkplaats over een minimale vrije hoogte van 9,00 m moet beschikken met een maximale bouwhoogte van 12,00 m (hoogte van de dakrand). Voor alle duidelijkheid: dat wil zeggen dat de vrije hoogte meer mag zijn dan 9,00 m en dat de bouwhoogte minder mag zijn dan 12,00 m.

Een hogere ligger zorgt in deze situatie ervoor dat de bouwhoogte groter wordt, waardoor de gevels hoger opgetrokken moeten worden. Er worden zo meer kosten gemaakt voor zetwerk als buitenafwerking, glaswolisolatie en binnendoosprofielen. Dan is er nog niet eens gesproken over de extra windbelasting. Op dit moment zijn alleen de kosten voor staal, fabricage, conservering en transport van de verschillende liggers inzichtelijk gemaakt met een calculatie. Het is niet duidelijk hoe groot de extra kosten zijn voor gevelsystemen, maar gezien de grote kostprijsverschillen in de calculatie is het zeer waarschijnlijk dat een staalconstructie met vakwerkliggers prijstechnisch interessant zal blijven; het hoogte verschil met de vakwerkligger is immers circa 1,40 m, dus de vermindering van het aantal vierkante meters gevel en de windbelasting is gering. Het is derhalve aan te bevelen dit vraagstuk als optie te geven aan de opdrachtgever en, indien gewenst, de kostprijsvoordelen van lagere gevels beter in kaart te brengen.

- › In de vakwerkligger is gerekend zonder excentriciteiten in de verbindingen tussen de verticalen en diagonalen met de boven- en onderrandstaven. Door de excentriciteiten zijn kleine momentpieken mogelijk, waarvan op dit moment de effecten niet duidelijk zijn. De excentriciteiten zijn noodzakelijk om het kruisen van de diagonalen met de verticalen te voorkomen en het laswerk minder complex te maken. Daarnaast is niet gerekend met dubbele verticalen in het midden van het vakwerk om een plaatsing mogelijk te maken.

Wat betreft de excentriciteiten is dit probleem ook van toepassing bij de windverbanden. Bij het maken van een 3D-tekenmodel in Tekla Structures bleek dat het niet altijd mogelijk is om windverbanden aan te brengen die van snijpunt naar snijpunt lopen in het stramien. Met deze excentriciteiten is opnieuw geen rekening mee gehouden bij het berekenen van liggers en kolommen. De verwachting is dat de trekkrachten in de windverbanden te klein zijn om bepalende momentpieken te veroorzaken en dus dat er geen zwaardere profielen nodig zullen zijn.

Om definitief vast te kunnen stellen of de staalconstructie als geheel voldoende sterk en stabiel is, is het altijd aan te bevelen om een 3D-rekenmodel te maken, zodat de relaties tussen de verschillende constructiedelen worden meegenomen in de resultaten. Pas dan kan worden aangetoond dat de constructie sterk en stabiel genoeg is om te worden gerealiseerd (al is de opdracht fictief).

- › Lang niet alle bout- en lasverbindingen zijn gedimensioneerd. Dit heeft te maken met het beperkte tijdsbestek en de hoeveelheid documentatie die nodig is voor dit eindwerk. Alvorens de constructiedelen in productie gaan is het aan te raden om extra verbindingen te dimensioneren op basis van een berekening. Hierbij gaat het in het bijzonder om de lasdiktes van de kokerprofielen in de vakwerkligger en om de lasdiktes bij de dubbele koppelplaten die de vakwerkhelften, waaruit de vakwerkliggers zijn opgebouwd, koppelt.
- › De kopgevels bestaan uit 6 velden van 5,83 m en 4 velden van 4,50 m, waarbij in beide nokken van het dak een verbinding gemaakt moet worden met de nok. Als er was gekozen voor 5 velden van 7,00 m en 3 velden van 6,00 m, dan was een verbinding in de nok voorkomen. Dit betekent niet dat het maken van een verbinding niet mogelijk is, omdat er altijd een oplossing te bedenken is. Dit had wel makkelijker gekund. Het voordeel is wel dat kleinere lengtes van de geprofileerde platen mogelijk zijn, waardoor de platen beter te hanteren zijn en de montage eenvoudiger wordt.
- › De plooi-toetsingen zijn uitgevoerd volgens de NEN 6770. Deze norm is ingetrokken sinds 6 april 2010 en is daarom niet meer geldig. Voor veel normen geldt dat deze zijn gebaseerd op de vorige norm, dus het is zeer waarschijnlijk dat de methode van de NEN 1993-1-1+C2 vergelijkbaar is met de NEN 6770. Voor de volledigheid is het aan te bevelen om de plooi-toetsing te doen volgens de nieuwe norm, maar de verwachting is dat plooien geen risico zal vormen voor de raat- en plaatliggers. Uit de calculatie blijkt met grote overtuiging dat de vakwerkligger het beste past bij de doelstelling om kostenefficiënt maar praktisch te bouwen. Op de definitieve staalconstructie heeft dit discussiepunt geen invloed.
- › De kolomvoetplaatverbindingen zijn berekend volgens de NEN 6772. Deze norm is eveneens ingetrokken op 6 april 2010 en is daarom niet meer geldig. De NEN 1993-1-8 is de vervanger van de NEN 6772. Het is aan te bevelen om de kolomvoetplaatverbinding te herberekenen volgens de nieuwe norm, maar de verwachting is dat de huidige kolomvoetplaatverbinding sterk genoeg is voor de meest belaste kolomvoeten.
- › Met de huidige configuratie van de windliggers zijn weinig problemen geconstateerd bij het maken van de verbindingen; de drukstaven bij de vakwerkligger hebben een acceptabele grootte, maar de drukstaven bij de IPE 550 ligger zijn ietwat te groot gebleken. Daardoor is gekozen voor een zwaarder HEA-profiel als ligger in de kopgevels; een HEA 200 (S235) bleek voldoende, maar er is gekozen voor een HEA 220 (S235). Met grotere kruizen was dit voorkomen, dus deze aanpassing aan de windliggerconfiguratie valt aan te bevelen. Alleen zo kan worden voorkomen dat de hoekstalen moeten worden gestapeld, waardoor de hoogte van de hoofdliggers minder belangrijk is.

Bijvoorbeeld: een HEA 220 heeft een hoogte van 210 mm met een vrije ruimte tussen de flenzen van 188 mm. In het geval er twee hoekstalen L 80x80x8 gestapeld worden toegepast is dus 160 mm nodig, plus een extra 10 mm voor de verbindingsplaat. Een HEA 220 heeft de juiste afmetingen, maar bij een kleiner H-profiel wordt dit steeds lastiger en moeten er ravelingen worden toegepast.

- › Wat betreft de betonfundering is niets bekend, dus is ervoor gekozen om de oude norm te gebruiken bij het berekenen van de kolomvoetplaatverbinding. Alvorens de staalconstructie wordt gerealiseerd moet een funderingsplan worden opgesteld.

Literatuurlijst

- Anupaju, S. (2019, 3 maart). *Plate Girder and Its Components*. The Constructor. Geraadpleegd op 15 maart 2022, van <https://theconstructor.org/structural-engg/steel/plate-girder-components/30439/>
- Barendsz, M. A., Blauwiekel, N., Hamerlinck, A. F., Den Hollander, J.-P., Huisman, R., Knüwer, G. J., Oosterveen, L., Pauw, M. C., Regtop, B., De Ridder, R., Timmerman, G. H. R., & Vreede, P. (2010). *Geprofileerde staalplaat voor daken en gevels*. Bouwen met staal.
- Blok, R. (2018). *Tabellen voor bouw- en waterbouwkundigen* (11de editie). ThiemeMeulenhoff.
- Bouwen met staal. (z.d.-a). *Gevel- en daksystemen | Bouwen met staal*. Geraadpleegd op 7 februari 2022, van <https://www.bouwenmetstaal.nl/themas/dak-en-gevelsystemen/>
- Bouwen met staal. (z.d.-b). *Kosten in perspectief | Bouwen met staal*. Geraadpleegd op 11 mei 2022, van <https://www.bouwenmetstaal.nl/themas/kosten/kosten-in-perspectief/>
- Dakisolatie-advies.nl. (2019, 5 februari). *Koud dak: opbouw en nadelen*. Geraadpleegd op 7 februari 2022, van <https://www.dakisolatie-advies.nl/koud-dak#:~:text=Het%20voordeel%20hier-van%20is%20dat,extra%20druk%20op%20de%20dakconstructie.>
- Dakplaten.be. (2019, 2 mei). *Dakbedekking: 5 voordelen van dakplaten voor je dakbedekking | dakplaten.be*. Dakplaten. Geraadpleegd op 8 februari 2022, van <https://dakplaten.be/2019/05/02/dakbedekking/#:~:text=Een%20dakplaat%20is%20een%20geprofi-leerde,eenvoudig%20tegen%20regen%20en%20wind.>
- De Koninggroep. (2019, 9 februari). *Staal conserveren: voorkom corrosie!* Geraadpleegd op 11 mei 2022, van <https://dekoningsgroep.nl/diensten/staal-conserveren/#gref>
- De Lepper, R. (2022, 14 januari). *Is een constructieberekening verplicht?* BouwadviesShop.nl. Geraadpleegd op 15 februari 2022, van <https://bouwadviesshop.nl/verbouw-tips/constructieberekening/is-een-constructieberekening-verplicht/>
- Driessen, K. (2021, 29 juni). *Is PIR isolatie brandbaar?* PIR isolatie XL. Geraadpleegd op 22 februari 2022, van <https://www.pirisolatiexl.nl/blog/is-pir-isolatie-brandbaar>
- Durieux. (2020, 25 juni). *Voordelen van een warm dak tegenover een koud dak*. Geraadpleegd op 7 februari 2022, van <https://dakwerkendurieux.be/voordelen-van-een-warm-dak-tegenover-een-koud-dak/>

- Dutch Profiles Centre B.V. (z.d.). *Sandwichpaneel waarbij links en rechts de afdekprofielen te zien zijn. Hierdoor vormen de panelen één geheel. In het grijs zijn de binnen- en buitenafwerking die het hardschuimpakket beschermt tegen invloeden van buitenaf. Daarnaast geeft de afwerking een moderne uitstraling en zijn verschillende opties mogelijk betreffende de uitstraling.* [Foto]. Snelle levering van sandwichpanelen. https://www.dutchprofiles.nl/wp-content/uploads/2017/12/sandwichpaneel_06.png
- Essent. (z.d.). *Wat is een koudebrug en hoe los je het op?* | Essent. Geraadpleegd op 22 februari 2022, van <https://www.essent.nl/kennisbank/isolatie/hoe-werkt-isolatie/koudebrug>
- Euro-build in Steel. (2008). *Voorbeelden in staalbouw* (The Steel Construction Institute, Red.; Bouwen met staal, Vert.). Steel Construction Institute.
- Europese Commissie voor Normalisatie. (2011). NEN-EN 1991-1-3+C1 - Eurocode 1: Belastingen op constructies - Deel 1-3: Algemene belastingen - Sneeuwbelasting. *NEN-EN 1991-1-3+C1 - Eurocode 1: Belastingen op constructies - Deel 1-3: Algemene belastingen - Sneeuwbelasting, 2011*, 16-24.
- General Services Holland bv. (2018, 20 september). *Thermische isolatie*. GSH | Industrial projects. Geraadpleegd op 9 februari 2022, van <https://gshbv.nl/producten-en-diensten/isolatie/thermische-isolatie/>
- Grünbauer, J. (z.d.-a). *Raatliggers met ronde openingen (patrijspoortliggers)*. Grünbauer BV. Geraadpleegd op 15 maart 2022, van <http://www.grunbauer.nl/ned/patrijspoort.htm>
- Grünbauer, J. (z.d.-b). *Slim construeren met raatliggers . . .* Grünbauer BV. Geraadpleegd op 13 maart 2022, van <http://www.grunbauer.nl/ned/inhoud1.htm>
- Hardeman van Harten. (2021, 19 januari). *Binnendozen*. Geraadpleegd op 21 februari 2022, van <https://hardeman-vanharten.nl/profielplaten-opbouwssystemen/binnendozen/>
- IBS Staalbouw. (z.d.). *Over ons*. IBS Hallenbouw. Geraadpleegd op 28 januari 2022, van <https://www.ibs-hallenbouw.nl/over-ons>
- InfoNu. (2013). *Wat zijn constructief sterke vormen?* Geraadpleegd op 3 maart 2022, van <https://wetenschap.infonu.nl/techniek/114062-wat-zijn-constructief-sterke-vormen.html>
- Insulation Solutions. (z.d.). *Recticel - RECTICEL Powerdeck / Insulation Solutions*. Geraadpleegd op 21 februari 2022, van <https://www.insulationsolutions.nl/producten/recticel/recticel-power-deck/>

- Isoleren-expert.nl. (2021, 4 maart). *PUR Isolatieplaten: Voordelen, Eigenschappen & Prijs*. Geraadpleegd op 9 februari 2022, van <https://isoleren-expert.nl/isolatieplaten/pur/>
- Isover. (z.d.-a). *CLADIPAN 32*. Geraadpleegd op 21 februari 2022, van <https://www.isover.nl/producten/cladipan-32>
- Isover. (z.d.-b). *Isover - Isover Cladipan 31 / Insulation Solutions*. Insulation Solutions. Geraadpleegd op 9 februari 2022, van <https://www.insulationsolutions.nl/producten/isover/isover-cladipan-31/>
- Joostdevree.nl. (z.d.-a). *plaatligger*. Geraadpleegd op 14 maart 2022, van <https://www.joostdevree.nl/shtmls/plaatligger.shtml>
- Joostdevree.nl. (z.d.-b). *raatligger*. Geraadpleegd op 13 maart 2022, van <https://www.joostdevree.nl/shtmls/raatligger.shtml>
- Joostdevree.nl. (z.d.-c). *verstijvingsligger*. Geraadpleegd op 15 maart 2022, van <https://www.joostdevree.nl/shtmls/verstijvingsligger.shtml>
- Kingspan Group. (z.d.). *Sandwichpanelen*. Geraadpleegd op 21 februari 2022, van <https://www.kingspan.com/nl/nl-nl/producten/geisoleerde-sandwichpanelen/kenniscentrum/voordelen-van-sandwichpanelen/wat-zijn-sandwichpanelen>
- Knauf Insulation. (z.d.). *Minerale wol van*. Geraadpleegd op 9 februari 2022, van <https://www.knaufinsulation.nl/producten/minerale-wol-van-knauf-insulation>
- Mijzen, D. T. (2021, 1 december). *Rc-waarde Berekenen en Uitleg | Scheidingsconstructie | HBA B.V.* Handelbouwadvies. Geraadpleegd op 9 februari 2022, van <https://www.handelbouwadvies.nl/rc-waarde-berekenen/>
- Mouw Hoedliggers. (z.d.). *Raatliggers*. Geraadpleegd op 13 maart 2022, van <https://compositesteelbeams.com/nl/onze-liggers/raatliggers>
- Nederlands Normalisatie-instituut. (2011). *NEN-EN 1991-1-3+C1 (nl) - Eurocode 1: Belastingen op constructies - Deel 1-3: Algemene belastingen - Sneeuwbelasting. NEN-EN 1991-1-3+C1 (nl) - Eurocode 1: Belastingen op constructies - Deel 1-3: Algemene belastingen - Sneeuwbelasting, 2011, 4.*
- Nederlandse Bruggenstichting. (z.d.-a). *Plaatligger*. Geraadpleegd op 14 maart 2022, van <https://bruggenstichting.nl/plaatligger#:~:text=Voor%201950%20werden%20die%20liggers,aan%20de%20lijfplaten%20worden%20gelast.>

- Nederlandse Bruggenstichting. (z.d.-b). *Vakwerkbrug*. Geraadpleegd op 19 maart 2022, van <https://bruggenstichting.nl/vakwerkbrug>
- NedZink. (2021, 1 december). *Capaciteit HWA berekenen - HWA buizen & dakgoten*. Geraadpleegd op 25 februari 2022, van <https://www.nedzink.com/nl/hemelwaterafvoer/capaciteit-hwa-berekenen/>
- Online Bouwbesluit. (2022, 1 februari). *Online Bouwbesluit*. Geraadpleegd op 9 februari 2022, van <https://www.onlinebouwbesluit.nl/>
- Pelecon B.V. (2020, 20 december). *De toekomst: duurzaamheid met staal – pelecon*. DE TOEKOMST: DUURZAAMHEID MET STAAL. Geraadpleegd op 5 april 2022, van <https://pelecon.nl/de-toekomst-duurzaamheid-met-staal/>
- Qwinpro dak- en wandpanelen B.V. (2021, 9 december). *Wat is een sandwichpaneel? Waarom zou je sandwichpanelen gebruiken?* Qwinpro. Geraadpleegd op 21 februari 2022, van <https://www.qwinpro.nl/wat-is-een-sandwichpaneel/>
- Reisiger, A. (2020, 28 september). *Wat is een sandwichpaneel?* Janjp.nl - Bouwmaterialen webshop. Geraadpleegd op 21 februari 2022, van <https://www.janjp.nl/wat-is-een-sandwichpaneel/#:%7E:text=Een%20sandwichpaneel%20bestaat%20uit%20twee,wordt%20door%20de%20twee%20buitenplaten.>
- SAB-profiel - A Tata Steel Enterprise. (z.d.). *Talloze mogelijkheden met SAB Binnendozen*. Geraadpleegd op 21 februari 2022, van <https://www.sabprofiel.nl/producten/binnendozen.html>
- SAB-profiel bv - A Tata Steel Enterprise (Red.). (2015). *Technisch handboek - Metalen dak- en gevelsystemen* (2de editie, Vol. 2015). SAB-profiel.
- Snijder, H. H., & Steenbergen, H. (2011). *Krachtswerking* (1ste editie). Bouwen Met Staal, Stichting.
- Solar Garant zonne-energie. (z.d.). *Zonnepanelen op een plat dak* [Foto]. Solar Garant zonne-energie. <https://solargarant.nl/zonnepanelen-plat-dak-offerte/>
- Solvari BV. (2020, 14 december). *Rotswol isolatie*. Isolatie-info.nl. Geraadpleegd op 9 februari 2022, van <https://www.isolatie-info.nl/isolatiemateriaal/rotskywol>
- Solvari BV. (2021a, juni 10). *Cellenglas isolatie*. Isolatie-info.nl. Geraadpleegd op 9 februari 2022, van <https://www.isolatie-info.nl/isolatiemateriaal/cellenglas>

Solvari BV. (2021b, november 25). *Soorten isolatie*. Isolatie-info.nl. Geraadpleegd op 9 februari 2022, van <https://www.isolatie-info.nl/soorten-isolatie>

Structural Guide. (2020, 26 oktober). *Plate Girder*. Geraadpleegd op 14 maart 2022, van <https://www.structuralguide.com/plate-girder/>

Sweco Nederland B.V. (2018, juli). *Regionale keringen – bediengebouwen Laaksche Vaart en Leursche Haven* (Nr. SWNL0227585).

https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.brabant.nl%2F-%2Fmedia%2Fd4b2a82cc5674c519b5743a392bb5a40.pdf&psig=AOv-Vaw2kVZ1U2egZRSBT5LVr9MYo&ust=1649232312803000&source=images&cd=vfe&ved=0CAoQjRxqFwoTCNDymbC7_PYCFQAAAAAdAAAAABAO

Van der Meer, T. (2022, 20 april). MTL lanceert digitaal magazine •. *Metaal Magazine*. Geraadpleegd op 11 mei 2022, van <https://www.metaalmagazine.nl/nieuws/mtl-metaal-magazine-lanceert-digitaal-magazine/91715/>

Verdouw. (z.d.). *Wat is glaswol? - Verdouw Bouwproducten*. Geraadpleegd op 9 februari 2022, van <https://www.verdouw.nu/wat-is-glaswol>

Webmaster Lekkageservice. (2020, 14 juli). *Wat is een koudebrug en wat kun je eraan doen?* Lekkageservice. Geraadpleegd op 21 februari 2022, van <https://www.lekkageservice.nl/nieuws/wat-is-een-koudebrug>

