

Afstudeer Rapportage: Variant Onderzoek Koning Willem I College



Auteur: Maarten Nieman
Studentnummer: [REDACTED]
Opleiding: Civiele Techniek aan De Haagse Hogeschool

Datum: 15-01-2024

Pieters Bouwtechniek Delft B.V.

Adres: Poortweg 4J, 2612 PA Delft, Nederland

Telefoonnummer: [REDACTED]

1 Achtergrondgegevens

De studie Civiele Techniek aan de Haagse Hogeschool wordt afgerond door middel van een afstudeerstage. Hier laat de student zien dat hij in de loop der jaren opgebouwde kennis kan toepassen in een werkomgeving en zich kan verdiepen in een onderzoek wat het bedrijf heeft aangeleverd. De afstudeeropdracht waar dit rapport over gaat is bij het bedrijf Pieters Bouwtechniek te Delft. De opdracht is gefocust op de specialisatie constructie met als onderzoek vraag:

“Hoe zou de draagconstructie van het Koning Willem I College ontworpen moeten zijn als dit in staal of beton was uitgevoerd en wat voor effect heeft dat op de bijbehorende milieuprestatie-eisen.”

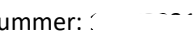
1.1 Persoonlijke gegevens:

Naam: Maarten Nieman

Adres: 

Telefoonnummer: 

Email: 

Studienummer: 

1^e stage: werkte ik als werkvoorbereider en tekenaar bij een aannemer Griekspoor.

Specialisatie: constructie

1.2 Gegevens Bedrijfsbegeleiders:

ing. Remco Alting MSEng RC

Email: 

ir. Jan Versteegen RO

Email: 

1.3 Gegevens docenten:

1^{ste} docent: ir. Klein, F.J. (Erik)

Email : 

2^{de} docent: ir. Schravendeel, P.L. (Peter)

Email : 

Afbeelding voorblad: (‘De Gelderlander’: Nieuwe Gebouw Koning Willem I College Valt in De Smaak | Foto oktober 2021)

2 Voorwoord

Na vier lange jaren mag ik mijn bachelor voor civiele techniek afronden met een afstudeerstage. Hier heb ik een variant-onderzoek uitgevoerd over het Koning Willem I College te Den Bosch waar ik de milieuprestaties en aanvullende eisen van het gebouw heb geanalyseerd. De varianten heb ik de tegen elkaar opgewogen en kunnen waarnemen wat de impact van de materiaalkeuze en ontwerpmethodie heeft op het totale resultaat van het gebouw.

De afgelopen maanden zijn voor mij ongelooflijk leerzaam geweest, waarbij ik diep heb kunnen duiken in de wereld van berekeningen en ontwerpmethodieken. Ik wil graag mijn oprechte dank geven aan mijn begeleider, Remco Alting, voor zijn hulp en de kennis die hij met mij heeft gedeeld. Telkens wanneer ik ergens tegenaan liep, wist ik dat ik met Remco's advies snel weer op het goede pad was. Daarnaast is Remco niet alleen een deskundige, maar ook een buitengewoon prettig persoon om mee samen te werken. Zijn constante bereidheid om te helpen, zelfs in mijn minder goede tijden, is iets waar ik enorm dankbaar voor ben.

Daarnaast wil ik mijn docenten van de Haagse Hogeschool bedanken, Erik Klein en Peter Schravendeel, voor alle hulp en feedback die ze mij gegeven hebben. Hun inbreng heeft mij onwijs geholpen om mezelf verder te ontwikkelen op dit vakgebied en natuurlijk ook persoonlijk. Ik had geen betere docenten kunnen wensen voor mijn afstudeerstage en zonder hen had ik ook zeer waarschijnlijk de specialisatie constructie niet gekozen.

Verder wil ik de directeurs Jan Versteegen en Rob Doomen hartelijk bedanken voor het mogelijk maken van deze afstudeerstage waar ik mezelf heb kunnen ontwikkelen van student naar (hopelijk) een bekwaam beginnend constructeur. Daarbij heb ik veel gehad aan de input die ze me hebben gegeven en heb daardoor mijn onderzoek ook naar een hoger niveau kunnen brengen.

En als laatste en zeker niet het minst wil ik mijn familie en al mijn vrienden bedanken voor de onschatbare hulp die ik van ze gekregen heb tijdens deze uitdagende periode. Zonder ze had ik het niet kunnen doen. Speciaal wil ik Louis en Elodie bedanken voor alle steun die ze me gegeven hebben. Vooral in tijden van nood toen mijn oudere broer in het ziekenhuis is terecht gekomen vanwege genetische hartproblemen en mijn jongere broertje vermist is geraakt. Hun steun heeft echt het verschil gemaakt en daar ben ik echt dankbaar voor.

Ik wil de lezer van dit rapport veel leesplezier wensen en moge de inhoud u informeren en inspireren!

Maarten Nieman
Delft, 15 januari 2024

3 Inhoud

1	Achtergrondgegevens	1
1.1	Persoonlijke gegevens:	1
1.2	Gegevens Bedrijfsbegeleiders:	1
1.3	Gegevens docenten:	1
2	Voorwoord	2
3	Inhoud	3
4	Inleiding	5
4.1	Aanleiding en achtergrond	5
4.2	Probleemstelling	5
4.3	Doelstelling	5
4.4	Onderzoeksvraag en deelvragen	5
5	Onderzoeksopzet	6
5.1	Algemene informatie van het gebouw	6
5.2	Ontwerpafbakening	7
6	Uitgangspunten	7
6.1	Normen en eisen	7
6.2	Gevolgklasse	7
6.3	Windbelasting	7
6.4	Belastingen	10
6.4.1	Belasting breedtes	10
6.4.2	Belasting combinatie	11
6.5	Maximale vervormingen	12
6.5.1	Maximale vervormingen van vloer elementen	12
6.5.2	Maximale horizontale verplaatsing	13
6.5.3	Veerstijfheid horizontale richting	13
6.6	Brandwerendheid	14
7	Varianten staal met betonnen kanaalplaatvloer	15
7.1	Variant ontwerpen	15
7.1.1	Variant 1 Origineel ontwerp	15
7.1.2	Variant 2 Midden kokers	16
7.1.3	Variant 3 Doorgetrokken kolommen	16
7.1.4	Variant 4 Visgraat	17
7.1.5	Variant 5 Optimalisatie	17
7.2	Controle varianten	17
8	EPD en Global Warming Potential onderzoek varianten	18
8.1	EPD-fases	18
8.2	EPD van staal	18
8.3	EPD van CLT	19
8.4	Tussenconclusie	20
9	MKI & MPG	21
9.1	MKI	21
9.2	MPG	21
10	Variant CLT vloeren	22
10.1	EPD van kanaalplaat vloeren	22

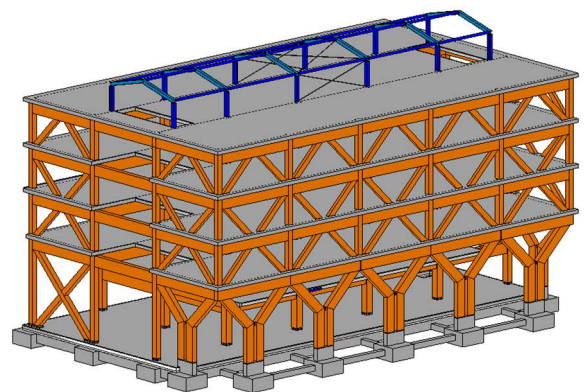
10.2	Variant 8x6	22
11	Variant 8X4 vloeren in andere richting opgelegd	23
11.1	Belastingen	24
11.2	Berekening voorgevel	24
11.2.1	Belastingen	24
11.2.2	Ontwerp uitgangspunten	25
11.2.3	Toetsing v.d. gevel	26
11.3	Berekening middelste stramien en achtergevel	26
11.3.1	Stramien as 100	28
11.3.2	Stramien (as 96)	28
11.3.3	Achtergevel (as 92)	28
11.4	Berekening zijgevels	29
11.4.1	Toetsing zijgevel (as AK)	30
11.4.2	Toetsing zijgevel (as BE)	30
11.4.3	Toetsing tussenliggers	31
11.5	Toetsing brandveiligheid	32
11.5.1	Brandwerendheid kolommen	32
11.5.2	Brandwerendheid liggers	33
11.5.3	Brandwerendheid overige profielen	33
11.6	Toetsing initiële scheefstand Y-kolom	34
12	Varianten beton	36
12.1	Variant staal + beton	36
12.1.1	Y-vormige kolommen beton	36
12.2	Toetsing betonnen kolommen	36
12.2.1	Dimensies kolom	36
12.2.2	Wapening berekening	37
13	Variant vergelijking	38
13.1	EPD berekening	38
13.2	MKI berekening	39
13.3	MPG berekening	40
13.3.1	Duurzaamheid	40
14	Conclusie	41
14.1	Aanbevelingen	42
15	Afkorting lijst	42
16	Bronnenlijst	43
17	Bijlage I: staal varianten berekeningen	44
18	Bijlage II: betonberekeningen A4	45
19	Bijlage III: Tekeningen staal & CLT variant	46
20	Bijlage IV: Tekeningen beton variant & CLT variant	47
21	Bijlage V: MKI en MPG berekening varianten	48
22	Bijlage VI: toetsing variant staal met CLT vloeren	49
23	Bijlage VII: concept schetsen	50

4 Inleiding

4.1 Aanleiding en achtergrond

In 2021 is het Koning Willem I college vernieuwd. Hier is de voormalige draagconstructie van de gevel aangepast naar een houten constructie en zijn er Y-vormige kolommen geplaatst op de begaande grond. Pieters Bouwtechniek heeft de constructieve berekeningen en een constructief ontwerp voor het gebouw gemaakt.

Nu is het bedrijf benieuwd hoe het gebouw zou moeten ontworpen zijn als het in plaats van een houten draagconstructie het in een stalen of betonnen constructie zou worden uitgevoerd en of er andere ontwerp mogelijkheden zijn om de milieu impact van het gebouw te verbeteren.



Figuur 1: Het Koning Willem I College

4.2 Probleemstelling

Pieters Bouwtechniek wil weten hoe een materiaalverandering van de draagconstructie effect heeft op het ontwerp van het Koning Willem I collegegebouw. Hoe vertaalt zich dat op de doorsnedes van de profielen en de Y-vormige kolommen als de draagconstructie in staal of beton wordt uitgevoerd in plaats van hout. Daarbij is het bedrijf benieuwd hoe de varianten toetsen op de milieuprestaties en welke variant hierop het beste scoort.

4.3 Doelstelling

Om te onderzoeken wat het effect van een materiaal verandering is, zullen er stabiliteit berekeningen gemaakt worden van de verschillende varianten door middel van handberekeningen en het programma Technosoft. Er zal worden gekeken hoe de doorsnedes van de draagconstructies gereduceerd kunnen worden. Daarbij zal ook onderzocht worden wat het effect van de materiaalkeuze is op het milieuprestatie-eisen van het gebouw. Dus in hoeverre het gebruik van hout voor een draagconstructies beter voor het milieu is? Aangezien bij hout vaker grotere profielen en doorsnedes benodigd zijn vanwege dat het een lagere elasticiteit modulus heeft dan staal en beton. Hiermee kan het bedrijf vergelijken of hout wel een betere optie is, of juist bewijzen dat het gebruik van hout een positieve impact heeft op het milieu en het vaker aan klanten kunnen aanbevelen.

4.4 Onderzoeksvraag en deelvragen

De onderzoeksvraag luidt: "Hoe zou de draagconstructie eruitzien als dit in staal of beton was uitgevoerd en wat voor effect heeft dat op de bijbehorende milieuprestatie-eisen." Met als deelvragen:

- "Wat zijn de bouweisen van het gebouw en welke factoren moeten worden meegenomen?"
- "Hoe komt het ontwerp eruit te zien als het in staal of beton wordt uitgevoerd?"
- "Voldoet de variant aan de eisen en is het constructief veilig?"
- "Kan het ontwerp aangepast worden om de keuze van de profielen te optimaliseren?"
- "Wat is de impact op het milieu van het gebruik van andere materialen?"

5 Onderzoekopzet

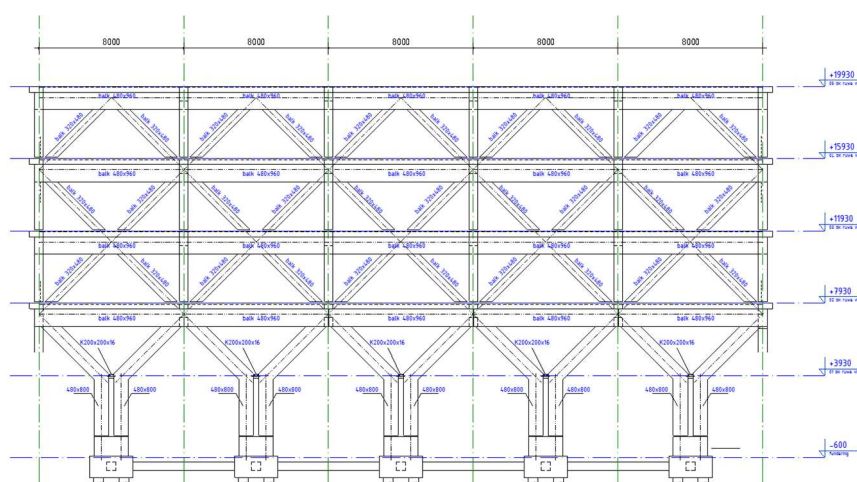
In dit rapport zullen meerdere varianten worden opgesteld. Een variant van staal en beton zal worden getoetst op duurzaamheid en er zal gekeken worden naar uitvoerbaarheid. Op basis van de duurzaamheidsberekeningen wordt onderzocht of er alternatieve opties zijn om de milieuscore verder te verbeteren.

5.1 Algemene informatie van het gebouw

Het Entreegebouw van het koning Willem I college heeft een houten draagconstructie van glued laminated timber oftewel: GLULAM. Dit is een manier om houten profielen te maken doormiddel van meerdere houten balken of planken aan elkaar te lijmen. Voor de houten draagconstructie zijn er stalen knoopverbindingen (figuur 3) gemaakt om de houten liggers, schoren en kolommen te verbinden.

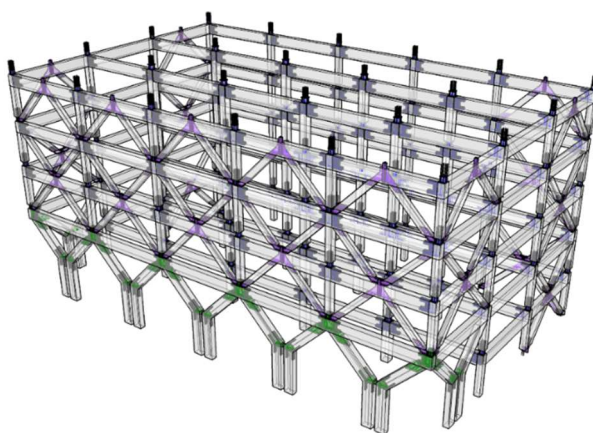
De vloeren zijn opgebouwd uit betonnen kanaalplaatvloeren en appartement vloeren. Het appartement vloeren zijn geplaatst op de kolomstroken en dienen om de grotere dwarskracht op te nemen die voorkomt uit de kleinere oplegging bij de kolommen.

Het gebouw heeft een hoogte van 20 meter, een lengte van 40 meter en is 24 meter breed. Daarbij heeft het een grid van 6 stramien in de lengte en 4 stramien in de breedte met een tussenafstand van 8 meter.



Figuur 2: Vooraanzicht van het gebouw

De stabiliteit van het gebouw wordt verzorgd door de in de achtergevel en zijgevels aanwezige gelamineerd houten windverbanden. De gevel is bij de verdiepingen voorzien van schoren, maar desondanks vertoont deze een slechte horizontale krachtsafdracht. Dit komt door de Y-vormige kolommen op de begane grond die geringe horizontale stabiliteit bieden. De zij- en achtergevels kunnen wel horizontale krachten opnemen omdat de constructie hier tot aan de begaande grond geschoord is. De slechte stabiliteit van de gevel wordt opgelost door middel van schijfwerving van de vloeren de horizontale kracht afdragen naar de achtergevel.



Figuur 3: Stalen knoop verbindingen ontwerp Pieters

Het originele idee voor de Y-kolommen was dat dit met een enkele kolom zou worden uitgevoerd. Dit ging constructief niet omdat de kolommen dan uitermate groot moesten worden wat niet realistisch was om uit te voeren. Daardoor zijn er twee kolommen parallel naast elkaar geplaatst met een tussenkoker om de spatkrachten op te vangen.

5.2 Ontwerpafbakening

Om de varianten niet te veel laten afwijken van het originele plan en binnen de projectgrens te blijven zullen er grenzen worden opgesteld.

De onderstaande constructieve uitgangspunten zijn van toepassing:

- De voorgevel heeft een afmeting van 40 meter in de breedte en 20 meter in de hoogte, met stramien maten van 8 meter. Indien nodig is er een enkele meter ontwerp marge.
- De fundering voor dit afstudeerproject zou buiten beschouwing blijven, wel kan er advies geleverd worden als de normaal krachten naar de paalfundering veel groter of kleiner worden en kan dit worden meegenomen in de variant vergelijking.
- Er wordt alleen gekeken naar het entree gebouw van het Koning Willem I college, andere delen zoals het atrium wordt buiten beschouwing gelaten.
- Voor de MPG berekening zullen onderdelen zoals: installaties, glazen gevels en inbouw buiten beschouwing worden gelaten aangezien dit buiten het vakgebied valt en door de varianten deze onderdelen niet veel zullen wijzigen.
- Er wordt niet gekeken naar de uitvoeringskosten van het gebouw en de varianten.

6 Uitgangspunten

In dit hoofdstuk worden de uitgangspunten toegelicht en dienen ze als richtlijnen en criteria die de basis leggen voor dit constructief rapport.

6.1 Normen en eisen

De nieuwbouw moet voldoen aan het bouwbesluit 2012. Dit betekent dat voor het constructief ontwerp de Eurocodes van toepassing zijn. De volgende normen worden gehanteerd inclusief de Nederlandse Nationale Bijlagen (NB):

NEN - EN 1990 Grondslagen van het constructief ontwerp

NEN - EN 1991 Belastingen op constructies

NEN - EN 1992 Betonconstructies

NEN - EN 1993 Staalconstructies

NEN - EN 1994 Staal – betonconstructies

NEN - EN 1995 Houtconstructies

6.2 Gevolgklasse

De gevolgklasse: CC2(B) voor onderwijsgebouwen met 2 of meer bouwlagen.

ontwerplevensduur: klasse 3 (50 jaar)

Gebouwcategorie: Klasse C3 – zonder obstakels voor rondlopende mensen.

6.3 Windbelasting

Het koning Willem I college is gevestigd in 's Hertogenbosch in een bebouwde omgeving.

Volgens de NEN-EN-1991-4 geldt er:

Windgebied: III

Omgeving: bebouwd

Gebouwhoogte: 25m

Extreme stuwdruk q_p : 0,8 kN/m²

Windwrijving kan volgens de NEN-EN 1991-1-4 Windbelasting hoofdstuk: 5.3 (4) verwaarloosd worden omdat het gebouw een oppervlakte parallel aan de wind kleiner is dan viermaal de oppervlakte loodrecht aan de wind. De zijkanen van het gebouw hebben een totaal oppervlakte van $2 \times 25,1 \times 24 = 1205 \text{ m}^2$ en de voor- en achtergevel hebben een totaal oppervlakte van $2 \times 41,1 \times 24 = 1973 \text{ m}^2$.



Figuur 4: Locatie KWIC Den Bosch

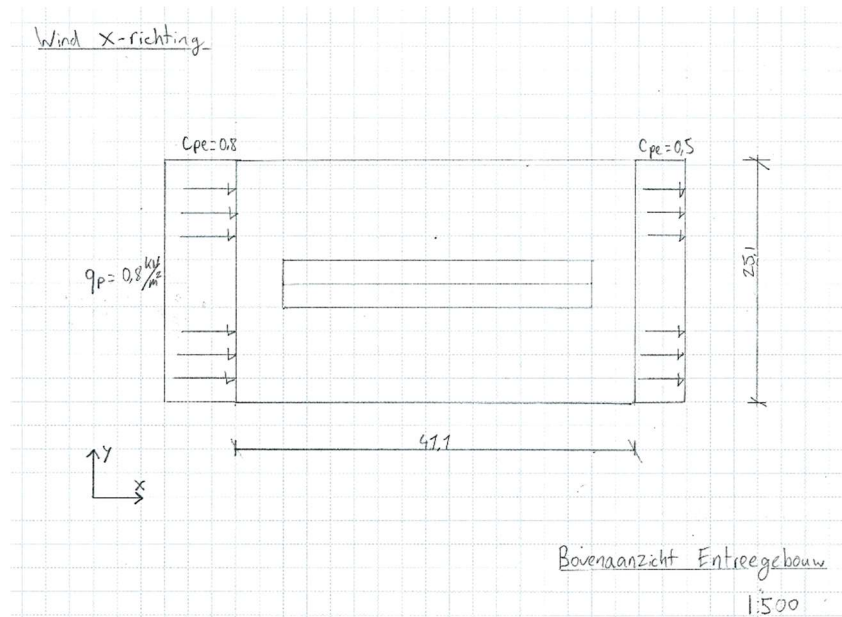
In uiterste grenstoestand STR gelden de volgende partiële factoren:

Blijvende en tijdelijke ontwerpsituaties		Blijvende belastingen		Overheersende veranderlijke belasting	Veranderlijke belastingen gelijktijdig met de overheersende	
		Ongunstig	Gunstig		Belangrijkste (indien aanwezig)	Andere
CC2	(Vgl. 6.10a)	1,35	$G_{k,j,sup}$	0,9	$G_{k,j,inf}$	1,5 $\Psi_{0,1} Q_{k,1}$ ($i > 1$)
	(Vgl. 6.10b)	1,2	$G_{k,j,sup}$	0,9	$G_{k,j,inf}$	1,5 $\Psi_{0,1} Q_{k,1}$ ($i > 1$)

In de bruikbaarheidsgrenstoestanden geldt partiële factoren $\gamma = 1,0$

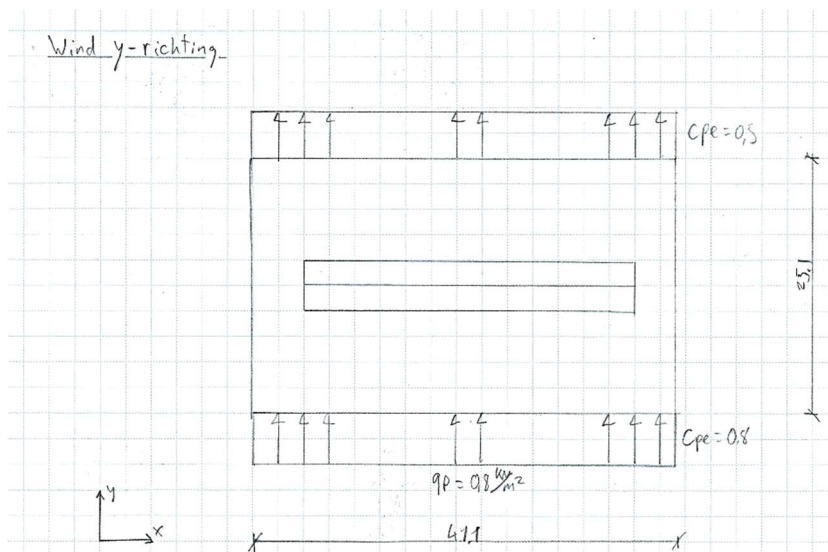
In de volgende afbeeldingen staat de wind belasting geschematiseerd van beide richtingen van het gebouw:

6.3.1.1 Schematisering bovenaanzicht gebouw wind x-richting:



Figuur 5: Windbelasting x-richting

6.3.1.2 Schematisering bovenaanzicht gebouw wind y-richting:



Figuur 6: Windbelasting y-richting

6.3.1.3 Berekening wind x-richting

Wind gebied III → bebouwd
belastingen: karakteristiek

$$H = 23,5 \text{ m} \quad b = 25,1 \text{ m} \quad q_p = 0,8 \text{ kN/m}^2$$

Oppervlakte stalen dakopbouw $A = 12,5 \text{ m}^2$

Uit NEN-EN 1991: $C_{fp} = 0,8 + 0,5$ (winddruk en zuiging coëfficiënt)

6.3.1.4 Windbelasting x-richting berekening:

$$F_d = 12,5 \cdot (0,8 + 0,5) \cdot 0,8 = 13 \text{ kN}$$

$$F_1 = \frac{1}{2} \cdot 25,1 \cdot 2 \cdot (0,8 + 0,5) \cdot 0,8 = 26,1 \text{ kN}$$

$$F_2, F_3 = \frac{1}{2} \cdot 25,1 \cdot 4 \cdot (0,8 + 0,5) \cdot 0,8 = 52,2 \text{ kN}$$

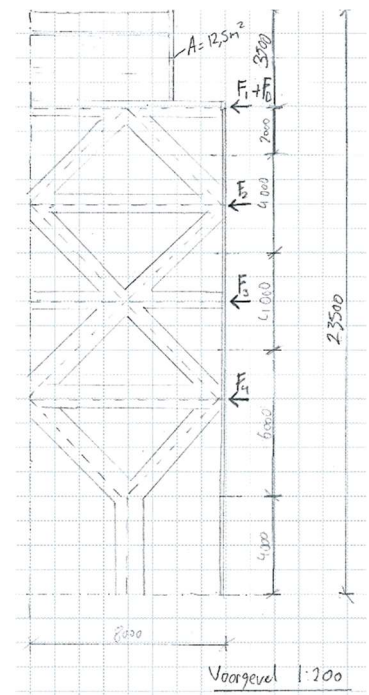
$$F_4 = \frac{1}{2} \cdot 25,1 \cdot 6 \cdot (0,8 + 0,5) \cdot 0,8 = 78,3 \text{ kN}$$

6.3.1.5 Berekening wind y-richting

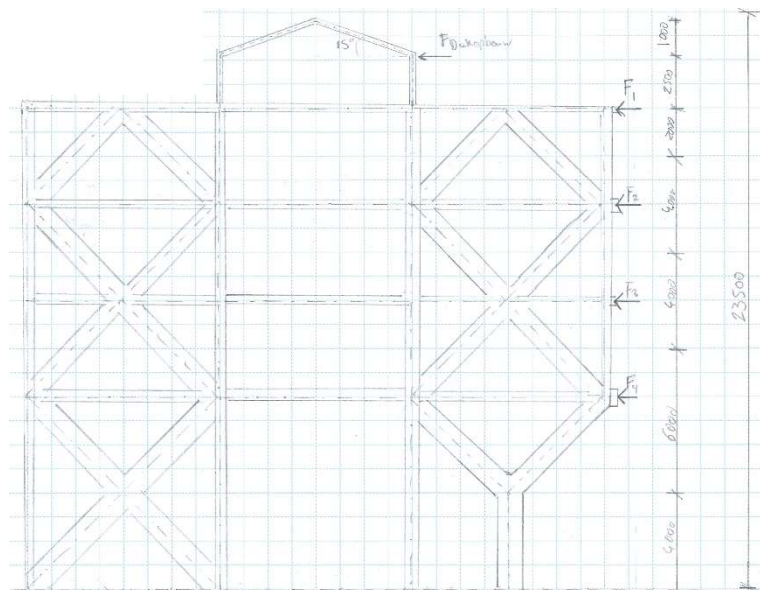
Windgebied III → bebouwd

belastingen: karakteristiek

$$q_p = 0,8 \text{ kN/m}^2 \quad \text{Gevelbreedte} = 41,1 \text{ m}$$



Figuur 7: Fragment windbelasting x-richting



Figuur 8: Windbelasting y-richting

6.3.1.6 Windbelasting y-richting berekening:

$$F_{dakopbouw} = 4,5 \cdot 0,8 \cdot (1,0 + 2,5) \cdot (0,8 + 1,5) = 29 \text{ kN}$$

$$F_1 = \frac{1}{2} \cdot 41,1 \cdot 0,8 \cdot 2 \cdot (0,8 + 0,5) = 42,7 \text{ kN}$$

$$F_{2,3} = \frac{1}{2} \cdot 41,1 \cdot 0,8 \cdot 4 \cdot (0,8 + 0,5) = 85,5 \text{ kN}$$

$$F_4 = \frac{1}{2} \cdot 41,1 \cdot 0,8 \cdot 6 \cdot (0,8 + 0,5) = 128,3 \text{ kN}$$

6.4 Belastingen

Dakvloer entreegebouw:

Mos sedum laag (verzadigd gewicht maximaal 150 kg/m ²)	1,50 kN/m ²
Dakbedekking en isolatie	0,20 kN/m ²
Gewapende druklaag d=60mm	1,50 kN/m ²
Kanaalplaatvloer d=260mm	4,00 kN/m ²
Installaties	0,25 kN/m ² +
	Gk = 7,45 kN/m²

Klasse C3-zonder obstakels voor rondlopende mensen (bijeenkomstruimten)	qk = 5,00 kN/m ²
Ψ0 = 0,40 Ψ1 = 0,70 Ψ2 = 0,60	Qk = 7,00 kN

Dakopbouw entreegebouw

Stalen dakplaten, isolatie en dakbedekking	0,25 kN/m ²
Mos sedum (verzadigd gewicht max 60 kg/m ²)	0,60 kN/m ²
Staalconstructie	0,40 kN/m ² +
	Gk = 1,25 kN/m²

Klasse H-daken (niet toegankelijk) 0 ≤ α < 15°	qk = 1,00 kN/m ²
Ψ0 = 0,00 Ψ1 = 0,00 Ψ2 = 0,00	Qk = 1,50 kN

1e 2e 3e 4e verdieping entreegebouw

Afwerklaag d=70mm	1,75 kN/m ²
Gewapende druklaag d=60mm	1,50 kN/m ²
Kanaalplaat/appartementenvloer d=260mm ¹	4,20 kN/m ²
Installaties	0,25 kN/m ² +
	Gk = 7,70 kN/m²

Klasse C3-zonder obstakels voor rondlopende mensen (bijeenkomstruimten)	qk = 5,00 kN/m ²
Ψ0 = 0,40 Ψ1 = 0,70 Ψ2 = 0,60	Qk = 7,00 kN

Gevel

Glazen gevel	1,50 kN/m ² +
	Gk = 1,50 kN/m²

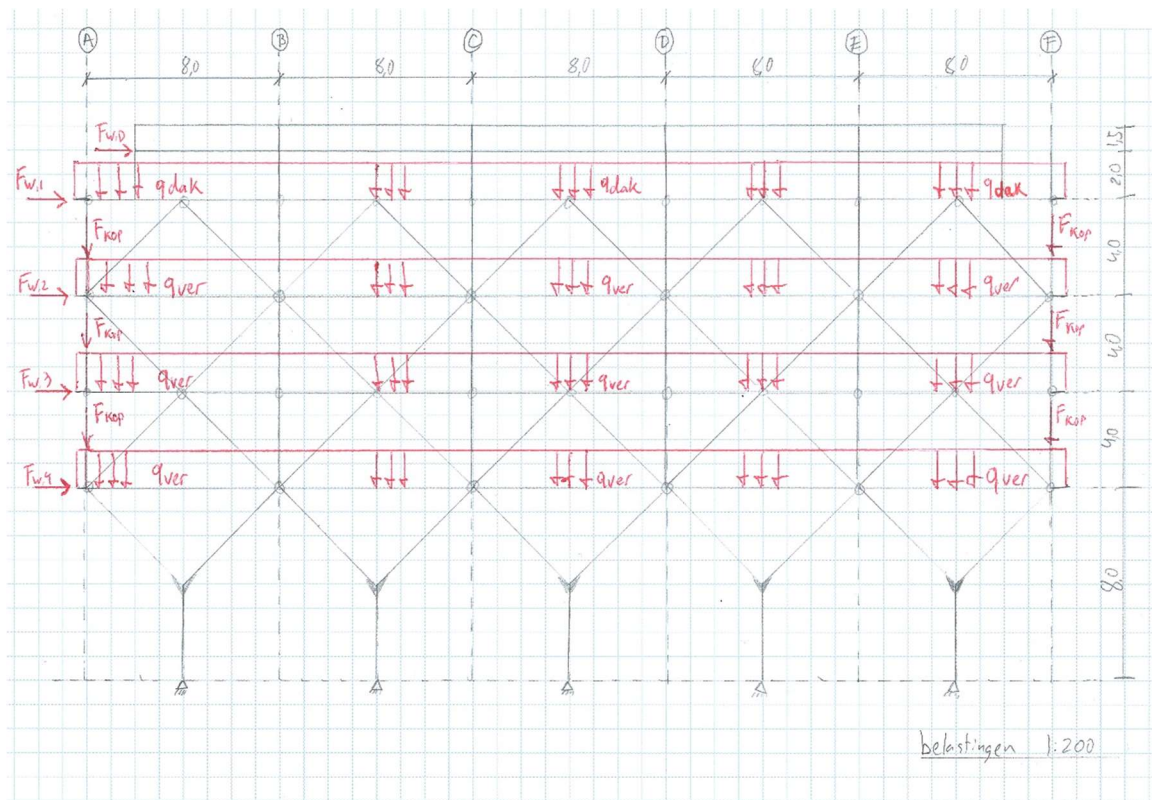
6.4.1 Belasting breedtes

Belastingbreedte van de vloer is een waarde van 4.5 m genomen omdat de vloeren nog een 500 mm uitsteken. De gevel bedraagt een hoogte van 4 meter.

					G	Q	
q_{verd.}	:	vloer	=	4,5 m *	7,70 5,0	=	34,7 22,5 kN/m
		Gevel	=	4,0 m *	1,50 -	=	6,0 - kN/m +
						=	40,7 22,5 kN/m
q_{dak.}	:	vloer	=	4,5 m *	7,45 5,0	=	33,5 22,5 kN/m
F_{kop}	:	kopgevels=		4,5 m * 4,0 m *	1,50 -	=	27,0 - kN

¹ Voor verdiepingsvloeren geldt: 75 % kanaalplaat d=260 (3,8 kN/m²) & 25 % appartementenvloer d=260 (5,1 kN/m²)

Gemiddeld gewicht vloer = 0,75x3,8 + 0,25x5,1 = 4,2 kN/m²



Figuur 9: Overzicht van de belastingen

6.4.2 Belasting combinatie

Voor de belastingcombinatie wordt de onderstaande tabel NB.4 uit de NEN-EN 1990 aangehouden. Om een goede vergelijking van de varianten te kunnen maken worden de constructieve onderdelen getoetst op de belasting combinaties die gebruikt voor het huidige gebouw. Daarbij zijn er enkele belasting combinaties getoetst waarbij de 1^{ste} en 2^{de} verdieping volledig belast worden. De 3^{de} verdieping en het dak worden deels belast. Dit is een realistische belasting combinatie die vaker zou kunnen optreden.

Blijvende en tijdelijke ontwerp situaties	Blijvende belastingen		Overheersende veranderlijke belasting	Veranderlijke belastingen gelijktijdig met de overheersende	
	Ongunstig	Gunstig		Belangrijkste (indien aanwezig)	Andere
(Vgl. 6.10a)	$1,35 G_{k,j,sup}^a$	$0,9 G_{k,j,inf}$		$1,5 \psi_{0,1} Q_{k,1}$	$1,5 \psi_{0,i} Q_{k,i} (i > 1)$
(Vgl. 6.10b)	$1,2 G_{k,j,sup}^b$	$0,9 G_{k,j,inf}$	$1,5 Q_{k,1}$		$1,5 \psi_{0,i} Q_{k,i} (i > 1)$

^a Bij vloeistofdrukken met een fysiek beperkte waarde mag zijn volstaan met $1,2 G_{k,j,sup}$.

^b Deze waarde is berekend met $\xi = 0,89$.

6.5 Maximale vervormingen

6.5.1 Maximale vervormingen van vloer elementen

Voor de maximale doorbuiging van een vloer element wordt de NEN-EN 1990 gehanteerd.



Figuur 10: Doorbuiging van vloer elementen

De toelaatbare verticale vervormingen van de vloeren²:

$$-w_2 + w_3 \leq 0,006 \times \ell_{rep}$$

(Hekwerken/balustrades t.p.v. vloerafscheidingen)

$$-w_2 + w_3 \leq 0,004 \times \ell_{rep} \text{ (daken niet intensief gebruikt door personen)}$$

$$-w_2 + w_3 \leq 0,003 \times \ell_{rep} \text{ (daken en vloeren intensief door personen gebruikt)}$$

$$-w_2 + w_3 \leq 0,002 \times \ell_{rep} \text{ (t.p.v. steenachtige wanden, maximaal 15 mm, bij uitkragingen maximaal 10 mm)}$$

ℓ_{rep} langste overspanning = 8000 mm

Voor dakconstructies:	$W_2 + W_3 \leq 0.004 \times 8000 =$	$W_{dak,max} =$	32 mm
-----------------------	--------------------------------------	-----------------	-------

Voor verdiepingvloeren:	$W_2 + W_3 \leq 0.003 \times 8000 =$	$W_{ver,max} =$	24 mm
-------------------------	--------------------------------------	-----------------	-------

Indien de doorbuiging meer dan 24 mm bedraagt en de profiel keuze vergroten geen optie is kan er zeeg worden toegepast op de liggers. De zeeg wordt met de doorbuiging ten volgen van de permanente belasting berekend en moet minimaal 10 mm zijn.

² Waarbij:

W_1 = De doorbuiging van de belastingcombinatie voor blijvende belasting voor korte duur eigenschappen

W_2 = De doorbuiging van de belasting combinatie (formule 6.16a en 6.16b), gelijk aan de doorbuiging bij de quasi-blijvende belasting combinatie bepaald met lange-duur eigenschappen verminderd met de doorbuiging bij de quasi-blijvende belasting combinatie bepaald met korte-duur eigenschappen.

W_3 = De doorbuiging door de belasting combinatie van veranderlijke belastingen.

ℓ_{rep} = De lengte van de overspanning.

6.5.2 Maximale horizontale verplaatsing

Toelaatbare horizontale vervormingen in karakteristieke belasting combinatie:

Voor gebouwen met één bouwlaag:

- $u \leq 1/150 \times h$ (voor industriegebouwen)
- $u \leq 1/300 \times h$ (andere gebouwen)

Voor gebouwen met meer dan één bouwlaag:

- $u \leq 1/500 \times h$ (voor het gehele gebouw)
- $u \leq 1/300 \times h$ (per bouwlaag)

Waarin h de kleinste gevelhoogte of de kleinste bouwlaaghoogte is.

Toelaatbare vervorming van afscheidingen ter plaatse van een hoogteverschil:

u = totale horizontale verplaatsing.

u_i = horizontale verplaatsing gerekend over de hoogte H_i van een verdieping.

Waarin H : de kleinste gevelhoogte is

$H = 20000 \text{ mm}$

$H_i = 4000 \text{ mm}$

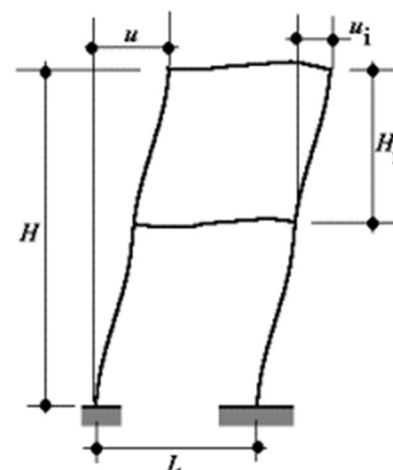
Waar u :

$$u \leq 1/500 \times H \text{ (voor het gehele gebouw)} \quad \Rightarrow u \leq 1/500 \times 20000 \text{ mm} = 40 \text{ mm}$$

en

$$u \leq 1/300 \times H_i \text{ (per bouwlaag)} \quad \Rightarrow u \leq 1/300 \times 4000 \text{ mm} = 13 \text{ mm}$$

Voor deze opdracht wordt er een aanname gemaakt om de maximale horizontale verplaatsing een waarde van 10 mm aan te houden per bouwlaag.



Figuur 11: Maximale horizontale verplaatsing

6.5.3 Veerstijfheid horizontale richting

Voor het 2d model van de gevel wordt er een horizontale veer gemoduleerd op de 1^{ste} verdieping aan weerskanten van de gevel (figuur 12). Deze veer komt voort uit de Y- kolommen langs de zijgevel aangezien daar ook een horizontale krachtsafdracht naartoe gaat. Er zal een handberekening voor de veerconstante gemaakt worden en daarnaast wordt het vergeleken met het Technosoft model.

Handberekening:

De gebruikte belasting komt voort uit het Technosoft model waarbij de totale windbelasting van de verdiepingen wordt meegenomen.

$$F_{windx} \rightarrow 169,9 \text{ kN} \rightarrow \text{zonder neerwaartse belasting}$$

$$u_{max} \rightarrow 10 \text{ mm}$$

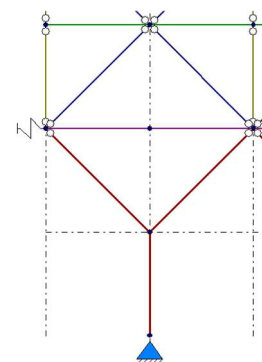
$$K = \frac{F}{u} \rightarrow K = \frac{169,9}{0,01} = 16990 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \approx 17 \text{ MN/m}$$

Reactiekracht uit technosoft:

$$F_{model} \rightarrow F_x = 294 \text{ kN}$$

$$K = \frac{294}{0,01} = 29400 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$2 \text{ veren} \rightarrow \frac{29400}{2} = 14700 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \approx 15 \text{ MN/m}$$



Figuur 12: Veerconstante horizontale richting

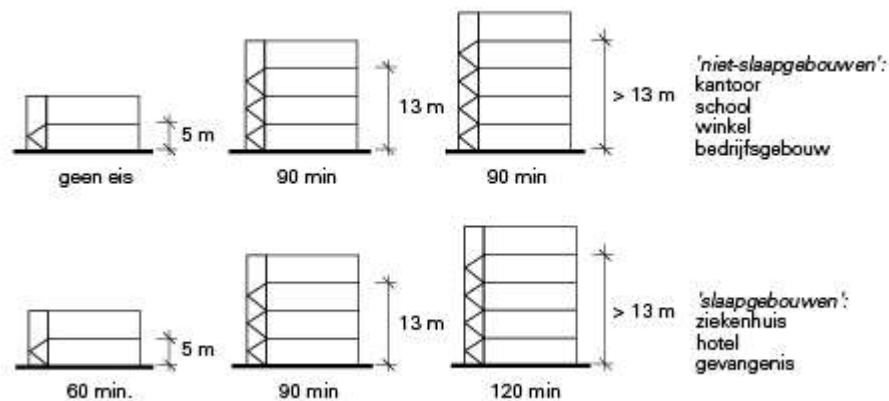
De waarden voor de veerconstante berekend met de handberekening en het technosoft model komen met elkaar overeen, voor de berekeningen wordt dus de zwakste waarde gebruikt van 15 MN/m.

6.6 Brandwerendheid

Het gebouw bedraagt een hoogte van bijna 23 meter. Volgens de brandeisen moet een gebouw met een onderwijsfunctie waarbij de hoogste gelegen vluchtroute boven de 13 meter ligt een minimale brandwerendheid eis van 90 minuten hebben.

Dit kan met 30 minuten gereduceerd worden mits er sprinklers worden geïnstalleerd. Alleen is deze regel niet toepasbaar als de permanente vuurbelasting hoger dan 500 MJ per m² bedraagt; wat een equivalente waarde heeft aan 25 kg hout per vierkante meter.

Daarbij wordt er met een belasting combinatie van: $\sum 1 \cdot \text{permanent} + 1 \cdot \text{veranderlijk} \cdot M_0$ gerekend



De brandveiligheid wordt getoetst met behulp met de rekentool: Brawesta.

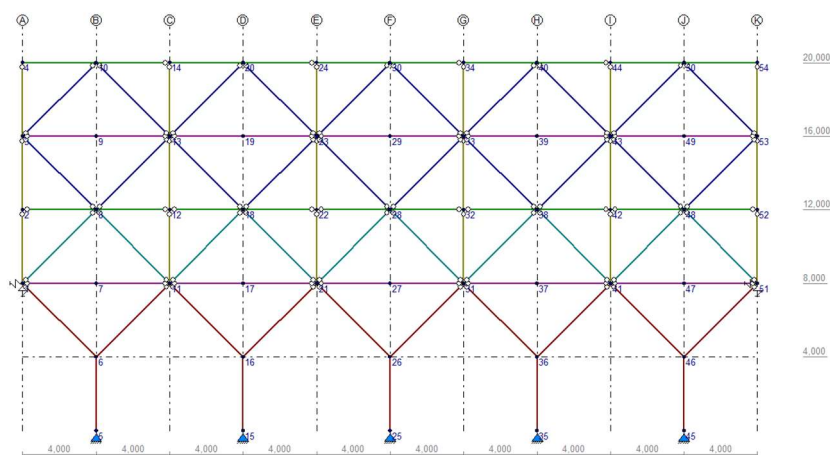
7 Varianten staal met betonnen kanaalplaatvloer

In dit hoofdstuk zullen de stalen varianten met betonnen kanaalplaatvloeren worden toegelicht en de ontwerpkeuzes worden verklaard. Tijdens het ontwerpproces van de varianten wordt er rekening gehouden met de duurzaamheid van de materialen en zal er ook nagedacht worden over de verbindingen van de onderdelen. Het staal heeft een staalkwaliteit van S355. In bijlage I staan de toetsingen van de varianten. In dit hoofdstuk wordt er alleen gekeken naar de gevel.

7.1 Variant ontwerpen

7.1.1 Variant 1 Origineel ontwerp

De eerste variant heeft dezelfde structuur als het originele ontwerp met een houten draagconstructie, alleen zijn de kolommen op de begane grond als enkele kolommen uitgevoerd. De originele tekening van de architect heeft een enkele kolom, maar het bestaande ontwerp heeft twee parallelle kolommen naast elkaar. De reden hiervoor is dat de houten kolommen erg breed zouden worden als er een enkele kolom van gemaakt wordt en dat was moeilijk uitvoerbaar. Staal heeft een hogere elasticiteitsmodulus dan hout dus is het niet benodigd om dubbele kolommen toe te passen en de krachten kunnen met een enkele kolom opgevangen worden.

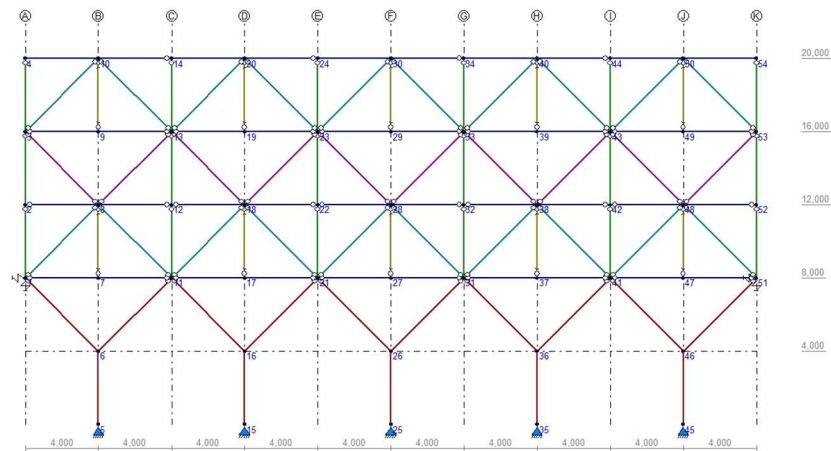


Figuur 13: Variant 1

Voor de liggers worden HEB500 profielen toegepast omdat de overspanning lengte 8 meter bedraagt en daardoor de buigende momenten in de liggers erg groot zijn. De voorkeur voor de ligger profielen was vierkante buisprofielen zodat de liggers beter torsie, die door de vloeroplegging ontstaan, kunnen opnemen, alleen is het door de grote momenten minder gunstig om een vierkante buisprofielen toe te passen. De torsie komt voort uit de vloeroplegging, waarbij een helft van de doorsnede van de gevelliger meer belast wordt dan de andere helft. Hierdoor ontstaat een interne torsie in het profiel. Om de torsie te kunnen opnemen worden er schotten gelast tussen de flenzen van de gevelliger. Door deze schotten krijg je in de doorsnede als het ware een rechthoek wat interne torsie kan opnemen. De kolommen op de verdieping vloeren zijn HEB 500 profielen zodat de verbindingen makkelijker gerealiseerd kunnen worden dan met kokerprofielen.

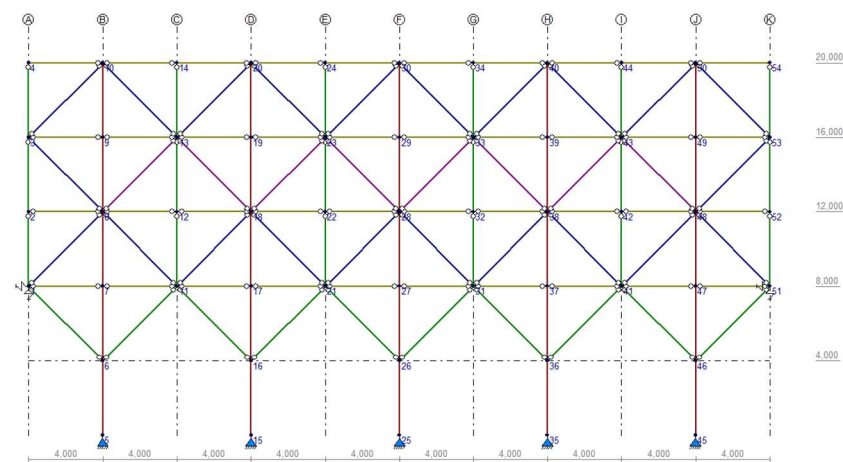
7.1.2 Variant 2 Midden kokers

Bij variant 2 wordt er onderzocht of de buigende momenten in de liggers kleiner gemaakt kunnen worden. Hiervoor worden verticale koker profielen toegepast waar de ligger overspanning 8 meter bedraagt, zie figuur 14. Hierdoor wordt de overspanning verkleind en zal het maximaal moment in de ligger afnemen waardoor een kleinere profielkeuze kan worden toegepast, dusdanig kan er een kokerprofiel worden toegepast.



Figuur 14: Variant 2

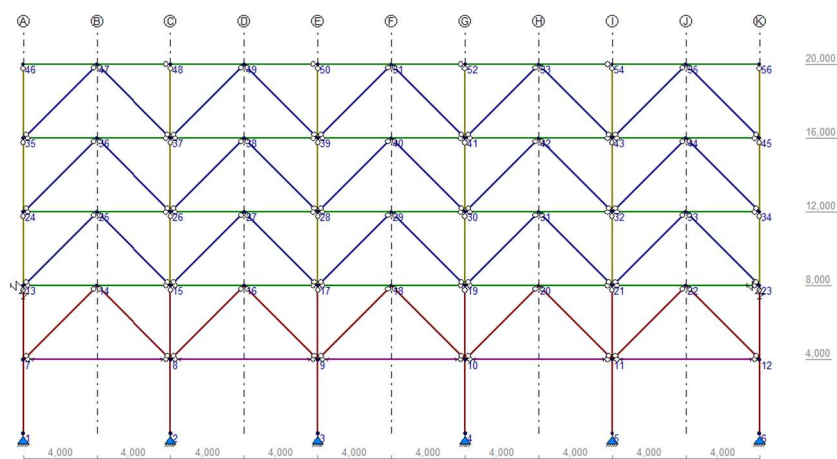
7.1.3 Variant 3 Doorgetrokken kolommen



Figuur 15: Variant 3

Voor de derde variant worden de Y-vormige kolommen aangepast naar drietand kolommen. Deze kolom wordt vervolgens over de gehele hoogte van het gebouw doorgetrokken. Dit is een HEB400 profiel zodat de verbindingen makkelijker kunnen worden uitgevoerd. Als vloer ligger is gekozen om een vierkante buisprofiel: K400/200/10 toe te passen. De reden hiervoor is om torsie op te vangen die kan ontstaan in de vloerligger en een vierkante buisprofiel is daarvoor geschikt.

7.1.4 Variant 4 Visgraat

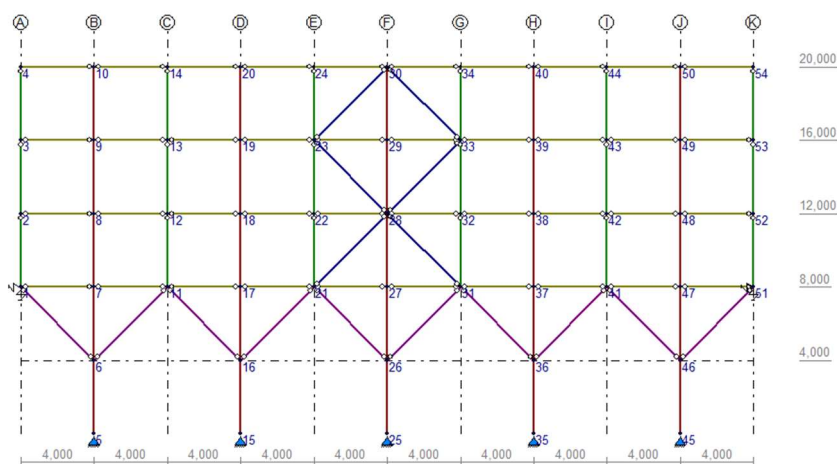


Figuur 16: Variant 4

Deze variant is anders vergeleken met de vorige varianten. Op de begane grond worden i.p.v. Y-vormige kolommen portalen toegepast. Daarbij worden de schoren op de 2^{de} verdieping verticaal omgedraaid zodat de ligger overspanning van de bovengelegen vloeren verminderd wordt. Deze variant heeft geen grote overspanning lengtes waardoor er efficiënter kan worden omgegaan met de profielen. Maar het is een stuk minder stabiel in dezelfde richting als de wind.

7.1.5 Variant 5 Optimalisatie

Variant 5 is vergelijkbaar met variant 3 maar veel schoren zijn er uit gehaald aangezien ze overbodig waren. Dit vermindert het eigengewicht aanzienlijk en is gunstig voor de fundering. Daarbij wordt er minder staal toegepast en scoort deze variant dus ook beter op de milieu prestatie score. De heeft weinig gelijkenis met het originele ontwerp, en oogt esthetisch ook minder goed.



Figuur 17: Variant 5

7.2 Controle varianten

De varianten kunnen gecontroleerd worden op de unity checks rond een waarde van 0,7. Dit is een bewuste ontwerpkeuze om een extra veiligheidsmarge te hebben en zodat verbindingen eenvoudiger gerealiseerd kunnen worden.

Om het rapport bondig te houden staat in bijlage I de berekeningen van de varianten waarbij de mechanica schema, normaal kracht en momentenlijn staan geschematiseerd. Per variant wordt er getoetst op: maximale moment, dwarskracht, normaal kracht, knik, kip en doorbuiging en de waardes staan aangegeven in de bijbehorende U.C score per profiel.

8 EPD en Global Warming Potential onderzoek varianten

Een Environmental Product Declaration (EPD) is een gestandaardiseerd document dat informatie verschaft over de milieuprestaties van een product gedurende zijn hele levenscyclus. De GWP oftewel de Global Warming Potential is hiervan een waarde die alle schadelijke stoffen en gassen omgerekend naar een CO₂ equivalente waarde. Bijv. 1 kg aan methaan gas heeft een equivalentie milieuschade van 25 kg CO₂ en 1 kg aan stikstof heeft een equivalente waarde van 298 kg CO₂ zoals wordt beschreven in bron 9: CO₂ equivalents.

Per variant is de CO₂ equivalent uitstoot berekend, dit is gedaan met behulp van Excel die de profiellengtes uit technosoft uitrekent naar totaal kilogram staal of volume van hout. Met de gegevens van bouwen met staal (bron 3: Bouwen met staal. (2022) Environmental Product Declaration. Zwaar constructiestaal, design for reuse) en de EPD waarden voor CLT (bron 5: Harmonisation of the environmental product declarations for wood products (2023)) worden de uitstoot van de gevelvarianten berekend. In het document: "berekeningen profiellengtes.xlsx" bevinden de berekeningen.

8.1 EPD-fases

EPD's zijn op gedeeld in meerdere fases: van productie fase tot einde levensduur en wat er daarbuiten nog aan eventuele opbrengsten plaatsvindt. Per fase onderdeel wordt er berekend wat de milieu impact is. De term: 'Cradle-to-Grave' worden de milieu impact van alle fases bij elkaar opgeteld en dat is de totale milieu impact. Bij 'Cradle-to-Gate' wordt er alleen gekeken naar de productie en constructie fase en worden de andere fases buiten beschouwing gelaten. In figuur 18 zijn de fases weergegeven.

PRODUCTIE FASE			CONSTRUCTIE		GEBRUIKSFASE								EINDE LEVENSDUUR				OPBRENGSTEN EN	
			PROCES										FASE				LASTEN BUITEN DE	
			FASE														SYSTEMGRENZEN	
Winning grondstoffen	Transport naar fabriek	Productie	Transport fabriekspoort tot bouwplaats	Montage	Gebruik	Onderhoud	Reparatie	Vervanging	Renovatie	Energie gebruiksfase	Waterverbruik	Demontage-sloop	Transport	Afvalverwerking	Stort	Hergebruik- Terugnwinning- Recycling- potentieel		
A1	A2	A3		A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D	
x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	ND	ND	x	x	x	x	x		

Figuur 18: Fases van Environmental Product Declaration

A-fase (Productie fase): In deze fase worden de grondstoffen en energiebronnen geïdentificeerd die worden gebruikt bij de winning en productie van het materiaal. Het omvat ook het transport van grondstoffen naar de productielocatie en de montage en plaatsing van het product.

B-fase (Gebruiksfase): Deze fase richt zich op het gebruik van het product tijdens zijn levensduur. Voor bouwmaterialen kan dit bijvoorbeeld het energieverbruik tijdens het gebruik van een gebouw zijn. Het omvat ook mogelijke onderhoudsvereisten en de milieu-impact die ontstaat tijdens het gebruik.

C-fase (Einde levensduur fase): Deze fase betreft de demontage recycling, of afvalverwerking van het product aan het einde van zijn levensduur. Het omvat de impact van het afvalbeheer, emissies tijdens afvalverbranding, recyclingprocessen, en andere aspecten die verband houden met het einde van de levensduur van het product.

D-fase (Opbrengsten en lasten buiten de systeemgrenzen): Hieruit komt mogelijke winning of extra lasten wat na de verwerking komt. Dit kan energie winning zijn tot achteraf optredende milieuschade. Let er wel op dat er voor veel (nieuwere) producten nog weinig onderzoek is gedaan over fase D, en daarom kan de waarde ervan in de loop van de tijd veranderen.

8.2 EPD van staal

De opgestelde Excel sheet leest ieder profiel vanuit het technosoft model en rekent dit om naar de hoeveelheid gewicht staal per profiel met behulp van een profiel database. Daarna kan het totaal kg staal per variant berekend worden. Vervolgens wordt met behulp van de Environmental Product Declaration (EPD) de ecologische impact van één kilogram staal vastgesteld. Als de bevestigingen van de stalen profielen geheel demontabel wordt uitgevoerd heeft dit een gunstigere EPD dan wanneer alles wordt gelast. Staal dat voor 80% hergebruikt kan worden heeft een EPD van 0,507 kg CO₂-eq/kg staal waartegen staal dat maar voor 18% hergebruikt kan worden is 1,05 kg CO₂-eq/kg staal. Het loont dus de moeite om het gebouw demonteerbaar te ontwerpen.

8.3 EPD van CLT

Deze EPD scores zijn bepaald aan de hand van de gegevens van Storaenso. Er wordt dus gekeken naar begin tot eindfase van het hout oftewel: Cradle-to-Grave. Daarmee worden alle stappen van het proces meegenomen in de CO2 berekening, dus van: de productie, het transport, het gebruik, de afbouw, en toekomstig gebruik.

Het eindproces oftewel fase D heeft een grote impact op de uiteindelijke GWP score van het gebouw. De vier voornaamste eindprocessen zijn: Hergebruik, Recycling (versnippering of hergebruik voor andere doeleinden), verbranden en storten. De meest ecologische opties zijn hergebruik en recycling. Dit heeft een uiteindelijke equivalente CO2 uitstoot van -703 kg/m^3 . Het heeft dus een uiteindelijke CO2 opname in plaats van een uitstoot. Daarna komt verbranding met een waarde van -220 kg/m^3 , wat tegenstrijdig aanvoelt want bij verbranding komt er veel CO2 vrij, maar omdat bij het verbrandingsproces de hitte gebruikt wordt voor het opwekken van energie. Er moet wel gezegd worden dat deze waarde voor de huidige tijd geldt en dat over 50 jaar zullen de eisen omtrent het verbranden van hout in plaatst van fossiele brandstof aangescherpt worden. Als laatste heb je de 'landfill' oftewel de stortplaats. Dit heeft een hoge CO2 waarde per m^3 omdat als het hout gaat rotten er veel methaan vrij komt, wat zeer schadelijk voor de natuur is. Vanwege het feit dat hout niet vaak op de stort gestort wordt, zal er in deze berekeningen er ook rekening mee gehouden worden dat deze waarde voor de rekenwaarde van de CO2 berekening niet mee berekend wordt.

EPD HOUT HERGEBRUIK	
Fase	GWP kg CO2 eq
A1	-7,29E+02
A2	1,42E+01
A3	8,10E+00
A4	3,84E+01
A5	1,48E+01
C1	5,42E-01
C2	2,04E+00
C3	7,62E+02
C4	0,00E+00
D	-8,14E+02
TOTAAL	-702,92 KG CO2/m3

EPD HOUT RE-CYCLING	
Fase	GWP kg CO2 eq
A1	-7,29E+02
A2	1,42E+01
A3	8,10E+00
A4	3,84E+01
A5	1,48E+01
C1	5,42E-01
C2	2,04E+00
C3	7,68E+02
C4	0,00E+00
D	-8,21E+02
TOTAAL	-703,92 KG CO2/m3

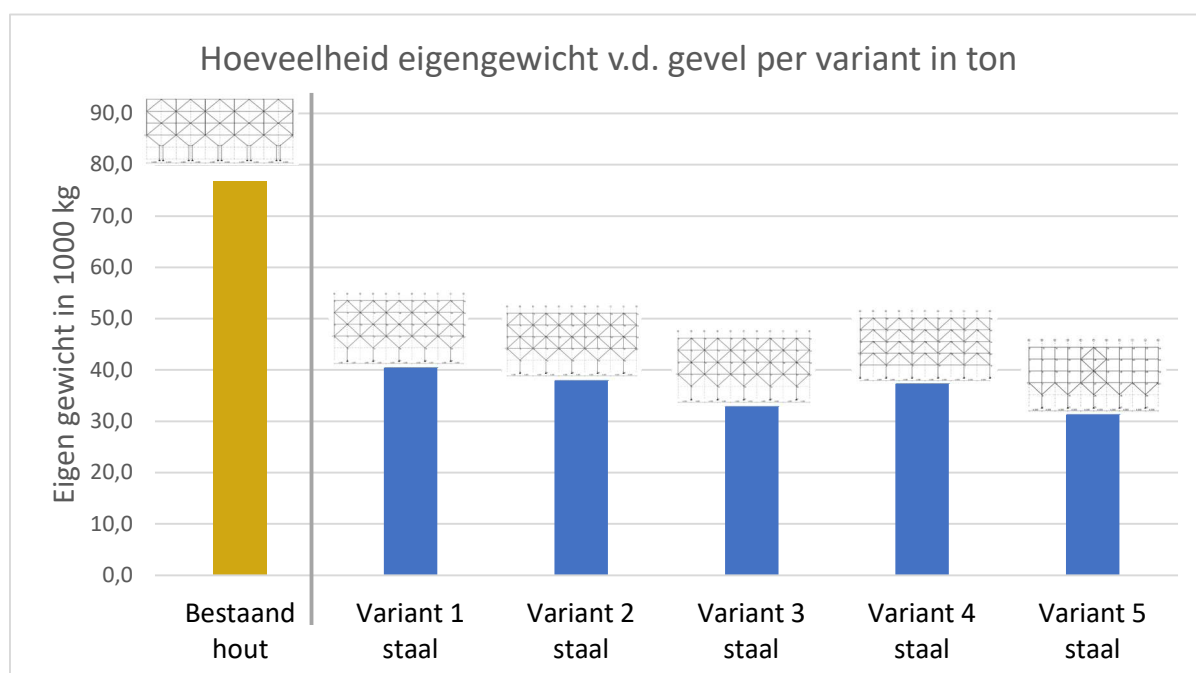
EPD HOUT VERBRANDING	
Fase	GWP kg CO2 eq
A1	-7,29E+02
A2	1,42E+01
A3	8,10E+00
A4	3,84E+01
A5	1,48E+01
C1	5,42E-01
C2	2,04E+00
C3	7,95E+02
C4	0,00E+00
D	-3,65E+02
TOTAAL	-220,92 KG CO2/m3

EPD HOUT LANDFILL	
Fase	GWP kg CO2 eq
A1	-7,29E+02
A2	1,42E+01
A3	8,10E+00
A4	3,84E+01
A5	1,48E+01
C1	5,42E-01
C2	2,04E+00
C3	0,00E+00
C4	1,05E+03
D	-3,93E+00
TOTAAL	395,15 KG CO2/m3

Om een latere vergelijking te maken waarbij er vergeleken wordt met alleen het begin proces van de onderdelen, dus van fase A1 tot A5 (gradle-to-gate) wordt het industrie gemiddelde genomen. Dit komt voor uit een onderzoek (bron 5: harmonisation of EPD'S for wood products). De waarde die aangehouden wordt is $-621 \text{ kg CO2 eq/m}^3$. Deze berekening wordt op een later stadium in het rapport gemaakt omdat er nog veel onzekerheid is over de eindfases (C t/m D) van CLT vanwege het een relatieve nieuwe bouwontwikkeling is.

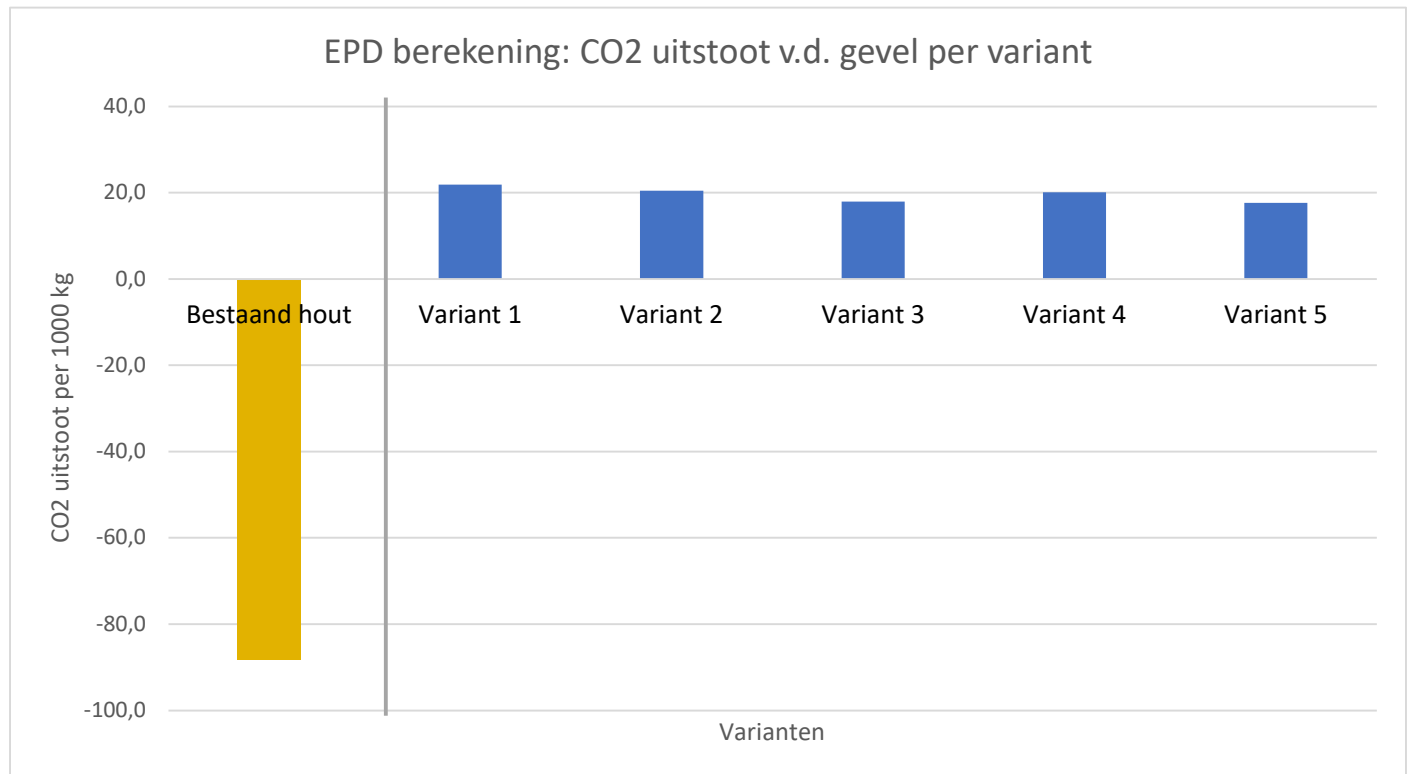
Variant vergelijking

Nu de EPD's per materiaal bekend zijn wordt er een berekening gemaakt van de hoeveelheid CO2 uitstoot per variant en bijhorende eigengewicht van de draagconstructie.



Figuur 19: Eigengewicht v.d. gevel per variant

Zoals te zien in figuur 19 is het eigengewicht van de stalen varianten aanzienlijk minder dan dat van hout. Vooral Variant 3 en 5 hebben hierop een gunstige score omdat deze varianten de overspanningen van 8 meter opdelen naar 4 meter en daardoor een reductie in profielkeuze genomen kan worden. Nu kan de uitstoot berekening van de gevel berekend worden.



Figuur 20: CO2 uitstoot van de varianten

Uit de uitstoot berekeningen komt dat de uitstoot van de stalen varianten aanzienlijk hoger is dan de houten variant. De reden hiervoor komt door de lage EPD score van hout. Als de berekening over de gehele draagconstructie van het gebouw gemaakt wordt dan wordt de houten variant alleen maar gunstiger uit dan die van staal.

8.4 Tussenconclusie

Uit het onderzoek blijkt dat uitsluitend de draagconstructie wijzigen naar staal geen gunstige invloed heeft op de totale CO2-uitstoot van het gebouw. Dit komt niet als verrassing omdat staal simpelweg meer uitstoot dan hout. Ondanks met geoptimaliseerde varianten is wel het eigengewicht van de draagconstructie omlaag gegaan maar de milieuprestatie van het gebouw dusdanig niet en de varianten 2 t/m 5 wijken af van het originele ontwerp dat gemaakt is door de architect. Er zou dus een aanpassing aan een van de andere bouwonderdelen moeten worden gemaakt om een betere milieuprestatie te behalen.

9 MKI & MPG

9.1 MKI

MKI, oftewel Milieu Kosten Indicator, is als het ware een denkbeeldige prijs die de kosten symboliseert om de negatieve milieueffecten van de productie van een bepaald bouwonderdeel te compenseren. Dit wordt ook wel schaduwkosten genoemd. Het is een hulpmiddel om de financiële aspecten van milieubelasting in kaart te brengen. Met behulp van de MKI kun je beoordelen hoe duurzaam en milieuvriendelijk een product daadwerkelijk is.

9.2 MPG

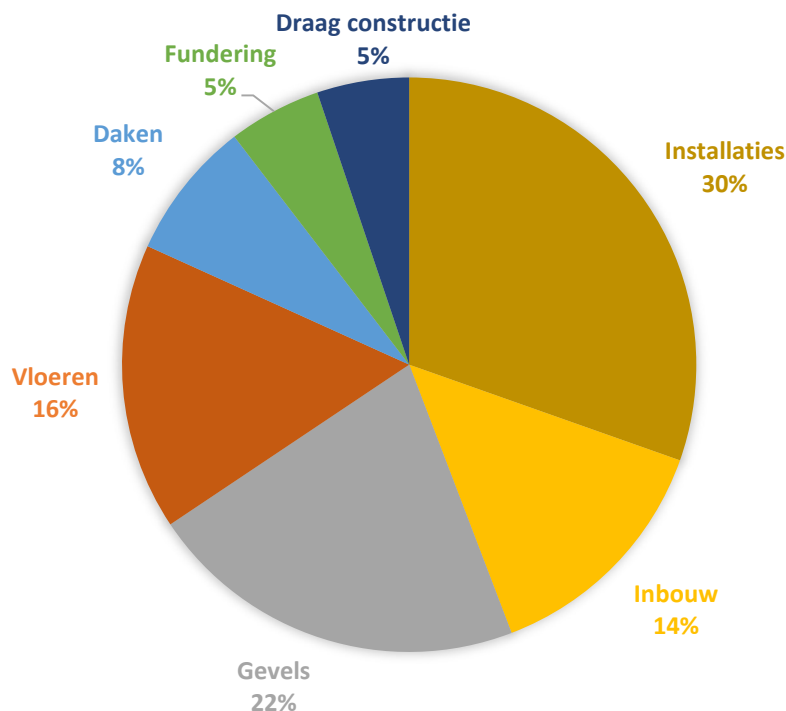
De Milieu Prestatie van Gebouwen (MPG) is een indicatie hoe goed een gebouw scoort op milieu doeleinden en prestaties rekening houdend met het bruto vloeroppervlakte en de levensduur. Dit is naast een EPD berekening een andere methode om de duurzaamheid van een gebouw te berekenen. Hierbij wordt berekend hoe veel uitstoot het op het milieu heeft. Hoe hoger de score, hoe slechter het voor het milieu is. Met de onderstaande formule wordt de MPG score berekend:

$$MPG = \frac{MKI (\text{€})}{\text{Bruto vloeroppervlakte (m}^2\text{)} * \text{Levensduur (jaar)}}$$

Tegenwoordig moeten gebouwen voldoen aan een MPG score van 0,8. Dit wil zeggen dat het een totale schaduwkosten van 0,8 euro per m² bouwoppervlakte bedraagt. Deze score is tegenwoordig al snel behaald met standaard bouwmethodes, bijv. betonskelet met kanaalplaatvloeren. Het is belangrijk om deze waarde zo laag mogelijk te houden. Daarbij zullen de toekomstige eisen voor MPG-scores strenger worden (bron 12: *Analyse aanscherping MPG-norm*). Er is sprake van om de MPG score naar 0,5 te verlagen en is het essentieel dat men hiermee rekening houdt.

Volgens het onderzoek duurzaamheidsprestaties van onderwijsgebouwen (bron 6: Duurzaamheidsprestaties onderwijsgebouwen MJA (2017)) hebben installaties, gevels en inbouw de grootste bijdrage aan de MPG score op projectniveau en dragen ongeveer 66% aan de totale score bij. Deze onderdelen kunnen helaas niet aangepast worden omdat het buiten het vakgebied valt. De hoeveelheid aan glas die voor de gevel gebruikt wordt kan eventueel verminderd worden om de uitstoot te reduceren. Waar wel een aanpassing gemaakt kan worden zijn de vloeren. Afhankelijk van het project hebben vloeren een grote bijdrage aan het totale CO₂ uitstoot omdat ze grote oppervlaktes hebben en hoe groter de overspanning hoe dikker de vloer moet zijn.

BIJDRAGE MPG SCORES PER BOUWONDERDEEL



Figuur 21: Bijdrage MPG scores per bouwonderdeel

10 Variant CLT vloeren

Cross Laminated Timber (CLT) zijn houten gelamineerde vloeren of wanden met een tweerichtings houtnerf. Deze vloeren zijn massief en doorgaans lichter in gewicht dan betonnen kanaalplaatvloeren, wat een gunstiger eigengewicht oplevert.

Onderzoek wijst uit dat vloeren een aanzienlijke bijdrage hebben aan de totale MPG-score en vaak veel meer dan de draagconstructie. Voor vloeren varieert dit tussen de 15% tot 40% afhankelijk van de projectsoort en vloerkeuze. Terwijl de draagconstructie maar vaak tussen de 5% tot 15% ligt.

Nu kan er een onderzoek gestart worden of er houten draagvloeren met een combinatie van staal of betonnen draagconstructie de totale MPG score van het gebouw zou verlagen. Uit het eerdere hoofdstuk: 'EPD onderzoeken varianten' blijkt het aanpassen van het materiaal van de draagconstructie niet mee te helpen met de totale MPG score. Het gebruik van houten vloeren zou een grotere impact op de MPG score kunnen hebben dan het gebruik van een houten draagconstructie. Vooral als dit wordt vergeleken met betonnen kanaalplaatvloeren.



Figuur 22: Cross-Laminated-Timber

10.1 EPD van kanaalplaat vloeren

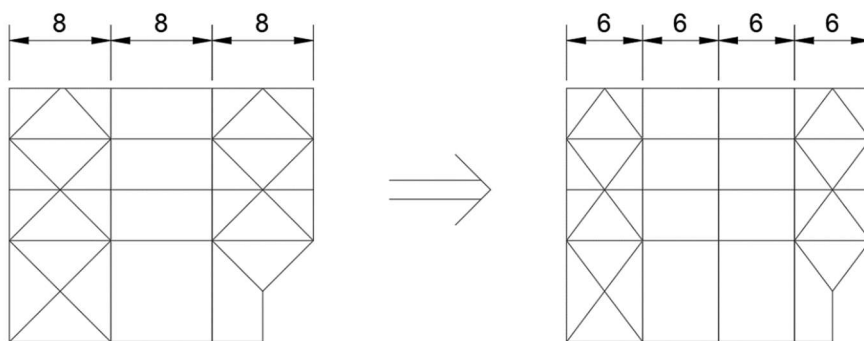
Kanaalplaatvloeren hebben een hoge CO₂-uitstoot vergeleken met CLT vloeren. De EPD van een CLT vloer van 200 mm dik is gemiddeld -621 kg CO₂-eq/m³. De vloeren van het Koning Willem I College bestaan uit 75% kanaalplaat vloeren en 25% appartementenvloeren. De appartementen vloer dienen voor een betere dwarskrachtcapaciteit die nodig is voor de kleine oplegging bij de kolommen. De appartementenvloeren hebben een hogere EPD waarde dan de kanaalplaatvloeren. Er zal dan een gewogen gemiddelde genomen worden van 75% kanaalplaat en 25% appartementenvloeren voor de totale EPD berekening en deze waarde is 69,97 Kg CO₂-eq/m².

Dit is een aanzienlijk verschil met de EPD van CLT en om dat het gebouw een grote vloer oppervlakte heeft zou er veel CO₂ uitstoot gereduceerd kunnen worden met het gebruik van CLT vloeren.

10.2 Variant 8x6

Om CLT vloeren te kunnen toepassen moet de vloeroverspanning worden veranderd. De vloeroverspanning bedraagt 8 meter terwijl CLT vloeren een maximaal economische overspanning van 6,8 m CLT vloeren kunnen hebben (bron 2: Martinsons (2017) CLT panelen. Tabel overspanningen).

Er wordt nu gekeken of de stramien maten kunnen worden aangepast om de vloer overspanning naar 6 meter te veranderen. Dit kan gedaan worden om een extra stramien over de breedte toe te voegen. Dus een verandering van 4 stramienen met een tussenafstand van 8 meter, naar 5 stramienen met een tussenafstand van 6 meter. Dit heeft als voordeel dat de belastingbreedte per stramien i.p.v. 4 of 8 meter naar 3 of 6 meter zou gaan. Dus de vloerbelastingen worden over meer stramienen verdeeld waardoor er lichtere profielen toegepast kunnen worden.

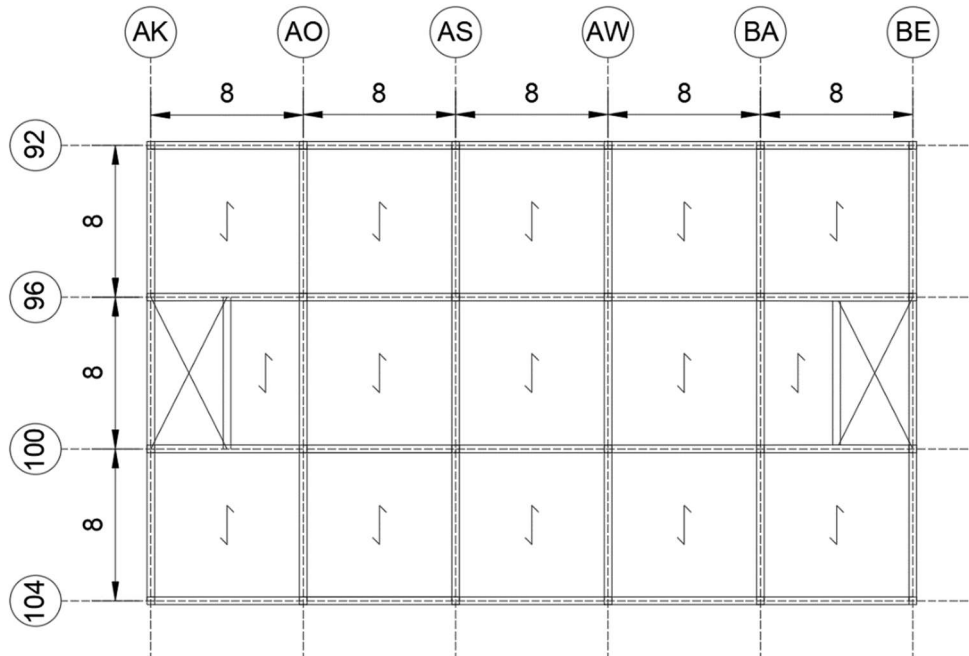


Figuur 23: Zijanzicht van het gebouw met stramienmaat van 8 naar 6 meter

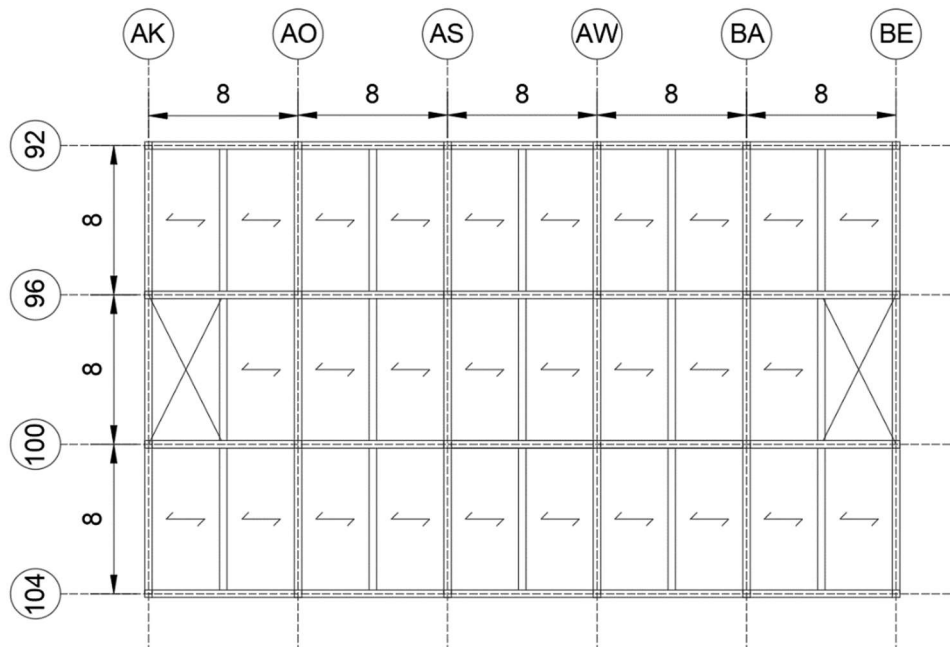
Hieraan zijn wel problemen aan gebonden. Heel het gebouw ontwerp zou aangepast moeten worden. Er is dus een extra fundering balk met minimaal 14 extra palen nodig en er zouden ook meer kolommen en liggers geplaatst moeten worden. De plaatsing van de installaties zou dan ook moeten veranderen. Hoewel de klaslokaal indeling ook aangepast zou moeten worden komt dit juist beter uit omdat de architect de meeste klaslokalen met een 6x8 raster ontworpen heeft en daardoor zouden veel kolommen, die eerst in het midden van vrije ruimtes stonden, nu op de hoeken van klaslokalen of in muren terecht komen. Uiteindelijk had deze aanpassing te veel complicaties en bovendien zou er kwaliteitsverlies van de één-op-één vergelijking met het huidige ontwerp ontstaan. Dit variant wordt daarom niet verder uitgewerkt.

11 Variant 8X4 vloeren in andere richting opgelegd

Op basis van de problemen van de 8X6 stramienmaat variant wordt er een andere variant getoetst waarbij de stramienmaten niet worden aangepast. Om de CLT vloeren te laten voldoen worden de vloeren in de andere richting overspannen en er worden tussenliggers geplaatst. Dit verkleint de overspanning naar 4 meter wat dus gunstig is voor de benodigde vloerdikte. Bij dit onderzoek wordt er vergeleken met het huidige bestaande ontwerp. Om een vergelijking met CLT-vloeren te kunnen realiseren wordt er dus een tussenligger geplaatst er zal geen variant worden opgesteld met tussenliggers en betonnen kanaalplaatvloeren voor het bestaande gebouw.



Figuur 24: Bovenaanzicht huidige vloeroplegging van het entree gebouw



Figuur 25: bovenaanzicht nieuwe vloeroplegging

11.1 Belastingen

De CLT-vloeren hebben een kleiner eigengewicht dan de betonnen kanaalplaat vloeren. Dit betekent dat de permanente belasting berekening opnieuw gemaakt moet worden. Daarbij moet de lijnlast op de liggers van de vloerbelastingen omgezet worden naar een puntlast. De CLT vloer heeft extra ballast nodig om een betere geluid demping te krijgen waardoor voor de afwerking een hogere permanente belasting krijgt.

Dakvloer entreegebouw:

Mos sedum laag (verzadigd gewicht maximaal 150 kg/m ²)	1,50 kN/m ²
Dakbedekking en isolatie	0,20 kN/m ²
CLT-vloer 200-5s + 50 kg/m ²	1,30 kN/m ²
Installaties	0,25 kN/m ² +
	Gk = 3,25 kN/m²

1e 2e 3e 4e verdieping entreegebouw

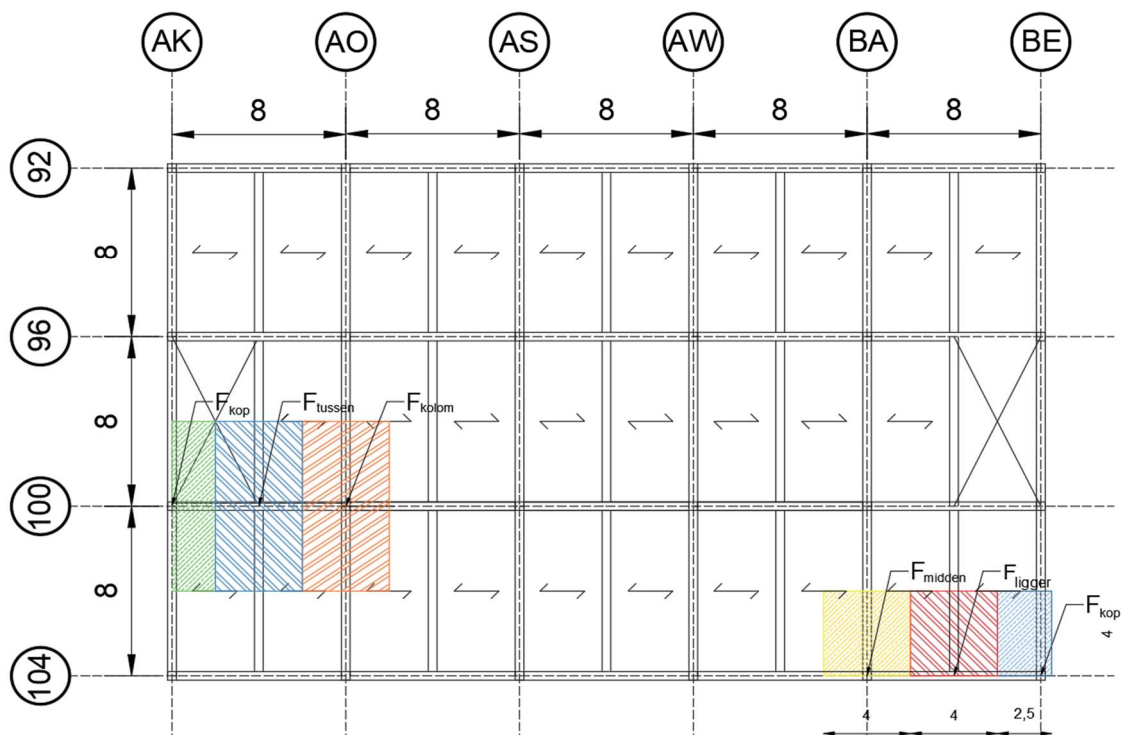
Zwevende dekvloer anhydriet 80 mm + afwerking	2,00 kN/m ²
Ballast laag	1,60 kN/m ²
CLT-vloer 200-5s + 50 kg/m ²	1,30 kN/m ²
Installaties	0,25 kN/m ² +
	Gk = 5,15 kN/m²

Klasse C3-zonder obstakels voor rondlopende mensen (bijeenkomstruimten) $q_k = 5,00 \text{ kN/m}^2$
 $\Psi_0 = 0,40$ $\Psi_1 = 0,70$ $\Psi_2 = 0,60$

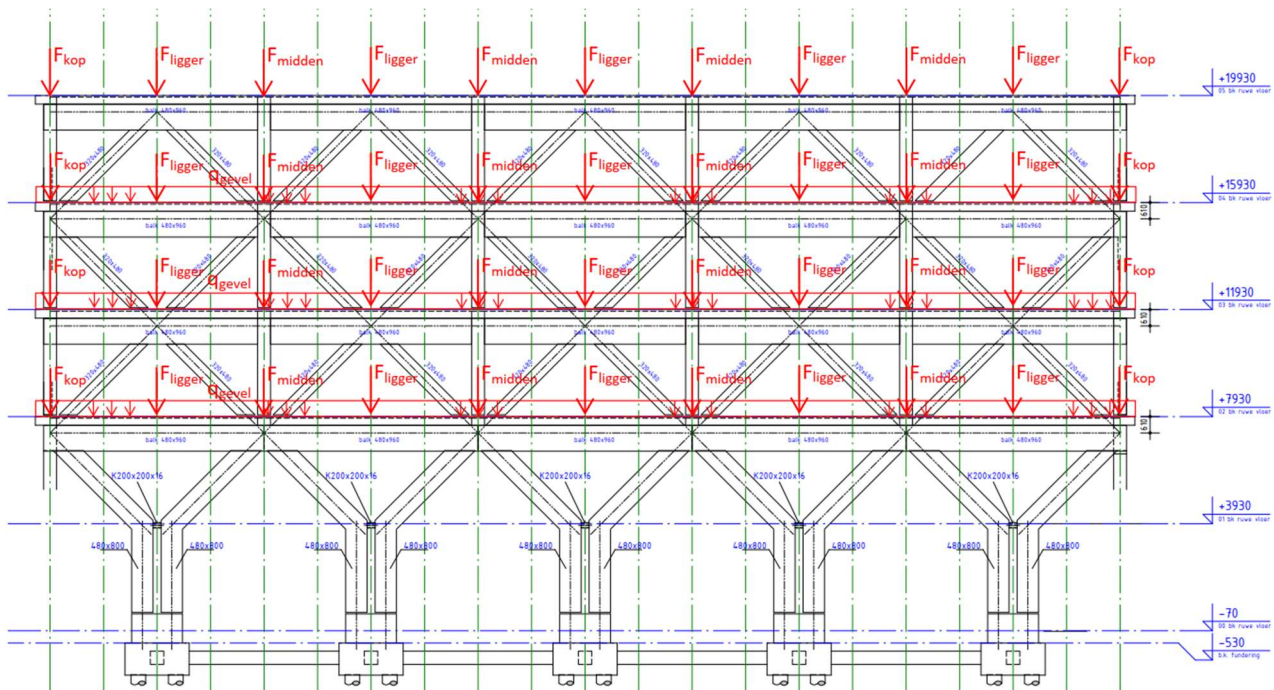
Tussenligger HEA 450. $L = 0,5 * 8 \text{ m} = 4 \text{ m}$ Gewicht = $140 \text{ KG/m} * 4 \text{ m}$ = $5,6 \text{ KN}$

11.2 Berekening voorgevel

11.2.1 Belastingen



Figuur 26: Belasting oppervlaktes



Figuur 27: Overzicht belastingen

Permanente belasting

F_{kop}	:	$2,5 \text{ m} \times 4,0 \text{ m} \times 5,15 \text{ kN/m}^2 + 1,4 \text{ kN/m} \times 4,0 \text{ m}$	= 57,1 kN
F_{ligger}	:	$4,0 \text{ m} \times 4,0 \text{ m} \times 5,15 \text{ kN/m}^2 + 1,4 \text{ kN/m} \times 4,0 \text{ m}$	= 88,0 kN
F_{midden}	=	F_{ligger}	= 88,0 kN

Veranderlijke belasting

Q_{vloer}	=	$5,0 \text{ kN/m}^2$	
F_{vkop}	=	$2,5 \text{ m} \times 4,0 \text{ m} \times 5,0 \text{ kN/m}^2$	= 50,0 kN
$F_{vligger}$	=	$4,0 \text{ m} \times 4,0 \text{ m} \times 5,0 \text{ kN/m}^2$	= 80,0 kN

Dak belasting

F_{bdkop}	=	$2,5 \text{ m} \times 4,0 \text{ m} \times 3,25 \text{ kN/m}^2 + 1,4 \text{ kN/m} \times 4,0 \text{ m}$	= 38,1 kN
F_{dmid}	=	$4,0 \text{ m} \times 4,0 \text{ m} \times 3,25 \text{ kN/m}^2 + 1,4 \text{ kN/m} \times 4,0 \text{ m}$	= 57,6 kN

Belastingen gevel

De gevel bedraagt een hoogte van 4 m.

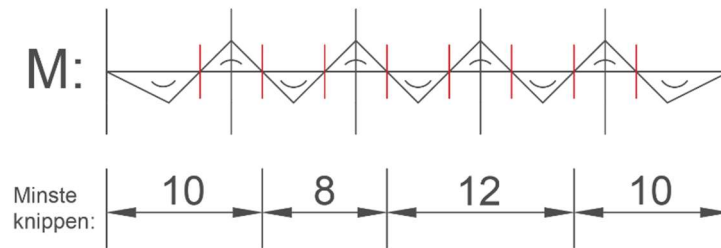
$$G_{gevel} = 6 \text{ kN/m}$$

Deze belastingen staan geschematiseerd in bijlage IV: Toetsing varianten CLT vloeren en stalen draagconstructie.

11.2.2 Ontwerp uitgangspunten

De liggers zijn over de gehele lengte doorgetrokken vanwege een gunstigere doorbuiging. Bij de variant van hout was dit niet mogelijk omdat er dan problemen zouden ontstaan bij de knopen en verbindingen. Daarbij zouden de gelamineerde liggers veel langer moeten uitgevoerd worden. Bij staal is dit niet het geval dus kunnen de liggers over de gehele lengte worden doorgetrokken.

Om dit uitvoerbaar te maken worden liggers aan de kopse kanten verlengd. Waar de liggers verlengd worden zal op een deel zijn waar het moment het kleinst is dus dat bevindt zich over het algemeen 2m vanaf de kolommen. Bij figuur 28 is dit weergegeven:



Figuur 28: Schematisering knipverbinding liggers

Om zo min mogelijk 'knippen' of verbindingen te maken worden de liggers op de bovenstaande afstanden opgebroken en verbonden. De rode strepen geven aan waar het moment gelijk aan nul is en de dimensies onder geeft aan wat de ligger lengtes moeten zijn, zodat waar de liggers worden verbonden geen of geen grote momenten zullen plaats vinden. Vervolgens wordt er op de bepaalde afstand een vaste verbinding gemaakt. Zie (bijlage III Tekening staal 2) voor de detaillering van deze verbinding.

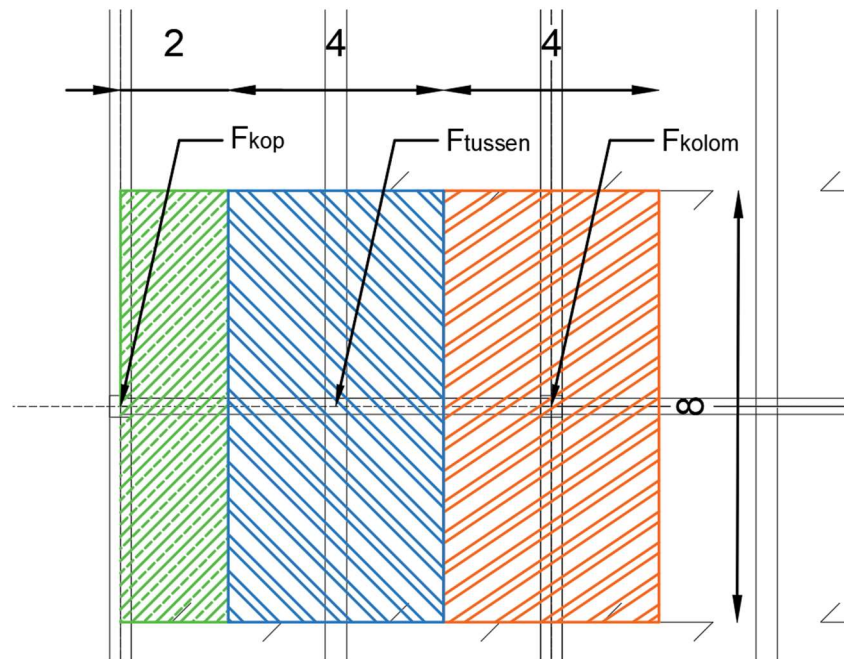
Door dit op deze methode te doen verbetert dit de doorbuiging van de liggers en kunnen er twee profielmaten kleiner toegepast worden (dus van HEA500 naar HEA400). Hierdoor kan het eigengewicht met 20% gereduceerd worden in vergelijking met wanneer de liggers tussen de kolommen scharnierend zijn opgelegd.

11.2.3 Toetsing v.d. gevel

De belastingen zijn nu bekend, er kan getoetst worden of de gekozen profielen voldoen waarbij de unity-check kleiner of rond de 0,7 is en niet de maximale doorbuiging en verplaatsing overschrijdt. De profielen zijn naar deze waarde geoptimaliseerd rekening houdend met de realisatie van de knoop verbindingen. In Bijlage VI staan de toetsing van de gevel en de andere stramien.

11.3 Berekening middelste stramien en achtergevel

Nu de voorgevel is constructieve berekeningen van de voorgevel zijn gemaakt kunnen de andere beuken ook berekend worden. Om een goede vergelijking te kunnen maken met het originele model zijn de middenstroken van het gebouw ook gemoduleerd en de profielen daarvan bepaald. Hiervoor wordt er een gewichtsberekening gemaakt.



Figuur 29 Belastingen van de middenstrook

Blijvende belasting

$$G_k = 5,15 \text{ kN/m}^2$$

$$G_{\text{tussenligger}} = 1,4 \text{ kN/m}^2$$

$$G_{\text{gevel}} = 6,0 \text{ kN/m}$$

$$\begin{aligned} F_{\text{kop}} &: 2,0 \text{ m} \times 8,0 \text{ m} \times 5,15 \text{ kN/m}^2 + 1,4 \text{ kN/m} \times 8,0 \text{ m} + 8,0 \text{ m} \times 6,0 \text{ kN/m} &= 141,6 \text{ kN} \\ F_{\text{kolom}} &: 4,0 \text{ m} \times 8,0 \text{ m} \times 5,15 \text{ kN/m}^2 + 1,4 \text{ kN/m} \times 8,0 \text{ m} &= 176,0 \text{ kN} \\ F_{\text{tussen}} &= F_{\text{kolom}} &= 176,0 \text{ kN} \end{aligned}$$

Veranderlijke belasting

$$Q_{\text{vloer}} = 5,0 \text{ kN/m}^2$$

$$F_{\text{vkop}} = 2,0 \text{ m} \times 8,0 \text{ m} \times 5,0 \text{ kN/m}^2 = 80,0 \text{ kN}$$

$$F_{\text{vkolom}} = 4,0 \text{ m} \times 8,0 \text{ m} \times 5,0 \text{ kN/m}^2 = 160,0 \text{ kN}$$

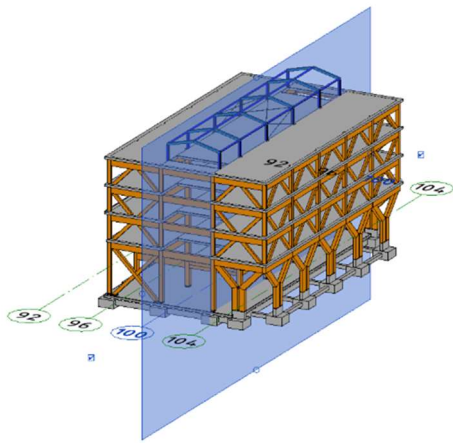
Dak belasting

$$G_{\text{dak}} = 3,25 \text{ kN/m}^2$$

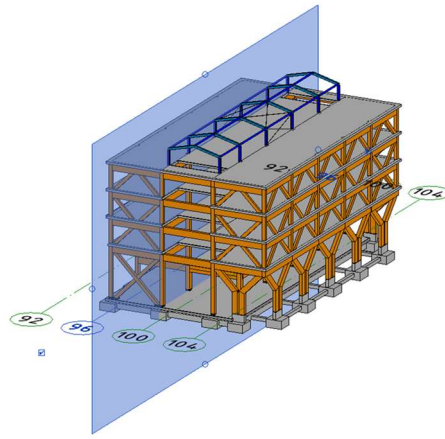
$$F_{\text{dkop}} = 2,0 \text{ m} \times 8,0 \text{ m} \times 3,25 \text{ kN/m}^2 + 1,4 \text{ kN/m} \times 8,0 \text{ m} = 63,2 \text{ kN}$$

$$F_{\text{dkolom}} = 4,0 \text{ m} \times 8,0 \text{ m} \times 3,25 \text{ kN/m}^2 + 1,4 \text{ kN/m} \times 8,0 \text{ m} = 115,2 \text{ kN}$$

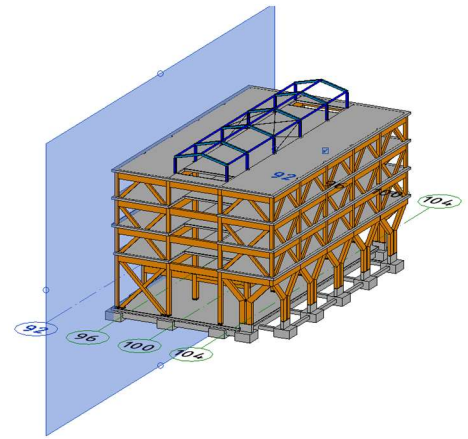
Deze belastingen staan geschematiseerd in bijlage IV: Toetsing varianten CLT vloeren en stalen draagconstructie.



Figuur 30: As 100



Figuur 31: As 96



Figuur 32: As 92

11.3.1 Stramien as 100

Deze as (figuur 30) is het eerste stramien vanaf de voorgevel gezien. De 1^{ste} verdieping van deze as heeft de helft van de belasting breedte. Dit komt omdat de verdieping niet volledig doorloopt tot aan de gevel. Hierdoor zijn de belastingen op deze verdieping gehalveerd.

De kolommen in het midden van het gebouw zijn om de sterke as geplaatst om de slechte horizontale krachtafdracht van de voorgevel te compenseren. De kolommen aan de kant van de zijgevel zijn in deze snede om de zwakke as gemoduleerd om het uitknikken te voorkomen. Hierover wordt meer toelichting gegeven in hoofdstuk 11.4

11.3.1.1 Toetsing

Als ontwerp keuze wordt er gestreefd naar een unity check van 0,7. De profielen worden getoetst op kip, knik, maximale spanningen en doorbuiging. De liggers mogen ook maar een maximale doorbuiging van 24 mm hebben.

De buitenste kolommen zijn om de zwakke as van het profiel berekend. Dit is zo gedaan om rekening te houden met de hoge windbelasting op de voorgevel die wordt opgenomen door de zijgevel.

De profielen voldoen aan de eisen. Er is echter ruimte voor verdere optimalisatie maar dan zouden er problemen kunnen ontstaan bij bepaalde staalverbindingen.

11.3.2 Stramien (as 96)

Deze stramien (figuur 31) is de 2^{de} middenstrook van het gebouw. Op deze strook loopt de 1^{ste} verdieping aan weerskanten dus de ligger op de eerste verdieping is tweemaal belast. De berekeningen zijn op dezelfde manier berekend als as 100.

Vanwege de vrijwel gelijke belastingwaarden als stramien 100, kan dezelfde profielopstelling worden toegepast. De buitenste kolommen zijn bij deze stramien ook om de zwakke as berekend. De kolommen op de begaande grond worden HEB500 toegepast vanwege de hoge normaalkracht op de kolommen. Door een zwaarder profiel te gebruiken wordt de knikvastheid verbeterd.

11.3.3 Achtergevel (as 92)

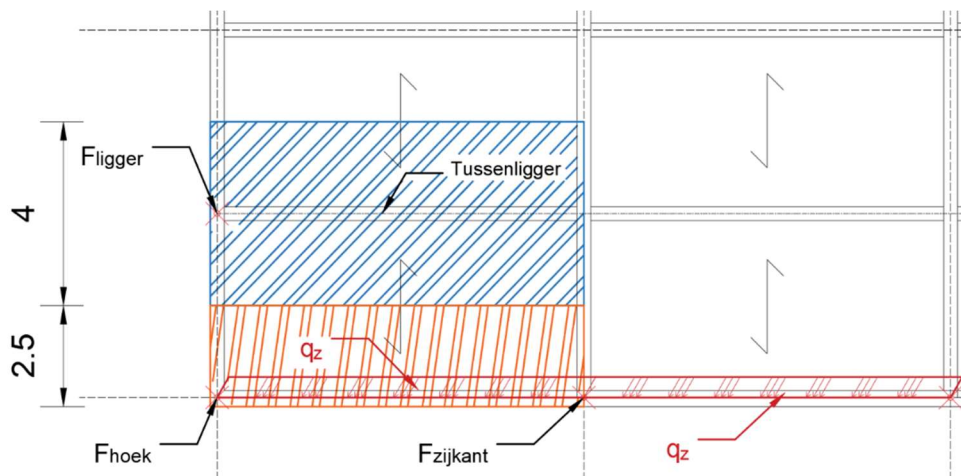
De achtergevel (figuur 32) heeft - in tegenstelling tot de voorgevel - een geschoorde constructie op de begane grond waardoor de windbelasting beter opgenomen kan worden. Bij de berekening wordt net zoals de voorgevel de windbelasting over de helft van de gebouw breedte meegenomen.

De andere berekeningen zijn op dezelfde manier uitgevoerd als as 96 en as 100. De uitkomsten staan in bijlage VI: toetsing variant staal met CLT vloeren.

11.4 Berekening zijgevels

Voor een goede beoordeling van de zijgevel dienen de belastingen aangepast te worden om ze te kunnen toepassen op de zijgevel. Hiervoor wordt de windbelasting gebruikt in hoofdstuk 6.3.1.5: Windbelasting handberekening y-richting.

Blijvende belasting



Figuur 33: belastingen van de zijgevel

$$G_k = 5,15 \text{ kN/m}^2 \quad G_{\text{tussenligger}} = 1,4 \text{ kN/m}^2 \quad G_{\text{gevel}} = 6,0 \text{ kN/m} \quad G_{\text{gevelligger}} = 1,25 \text{ kN/m}$$

$$\begin{aligned} F_{\text{hoek}} &= \frac{1}{2} \times F_{\text{fligger}} \\ F_{\text{hoek}} &= \frac{1}{4} \times 4,0 \text{ m} \times 8,0 \text{ m} \times 5,15 \text{ kN/m}^2 + \frac{1}{4} \times 8,0 \text{ m} \times 1,4 \text{ kN/m} + 4,0 \text{ m} \times 1,25 = 49,0 \text{ kN} \\ F_{\text{zijkant}} &= \frac{1}{2} \times 4,0 \text{ m} \times 8,0 \text{ m} \times 5,15 \text{ kN/m}^2 + \frac{1}{2} \times 8,0 \text{ m} \times 1,4 \text{ kN/m} + 4,0 \text{ m} \times 1,25 = 93,0 \text{ kN} \\ q_z &= 2,5 \times 5,15 \text{ kN/m}^2 + 6,0 \text{ kN/m} = 18,9 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Veranderlijke belasting

$$Q_{\text{vloer}} = 5,0 \text{ kN/m}^2$$

$$\begin{aligned} F_{\text{vkop}} &= \frac{1}{4} \times 4,0 \text{ m} \times 8,0 \text{ m} \times 5,0 \text{ kN/m}^2 = 40,0 \text{ kN} \\ F_{\text{kolom}} &= \frac{1}{2} \times 4,0 \text{ m} \times 8,0 \text{ m} \times 5,0 \text{ kN/m}^2 = 80,0 \text{ kN} \\ q_v &= 2,5 \times 5,0 \text{ kN/m}^2 = 12,5 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Dak belasting

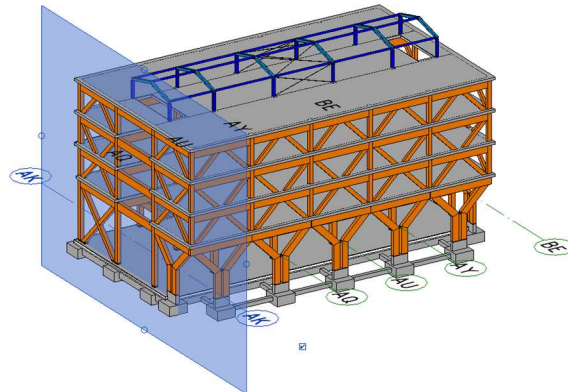
$$G_{\text{dak}} = 3,25 \text{ kN/m}^2 \quad G_{\text{gevelligger}} = 1,25 \text{ kN/m}$$

$$\begin{aligned} F_{\text{hoek}} &= \frac{1}{4} \times 4,0 \text{ m} \times 8,0 \text{ m} \times 3,25 \text{ kN/m}^2 + \frac{1}{4} \times 8,0 \text{ m} \times 1,4 \text{ kN/m} + 4,0 \times 1,25 = 33,8 \text{ kN} \\ F_{\text{zijkant}} &= \frac{1}{2} \times 4,0 \text{ m} \times 8,0 \text{ m} \times 3,25 \text{ kN/m}^2 + \frac{1}{2} \times 8,0 \text{ m} \times 1,4 \text{ kN/m} + 4,0 \times 1,25 = 62,6 \text{ kN} \end{aligned}$$

Deze belastingen staan geschematiseerd in bijlage IV: Toetsing varianten CLT vloeren en stalen draagconstructie.

11.4.1 Toetsing zijgevel (as AK)

Er worden H-profielen toegepast die een sterke en zwakke kant hebben. Omdat de snede (as AK) loodrecht staat op de eerder genoemde stramienien zijn de kolommen van de achtergevel in het Technosoft model om de zwakke zijde berekend.

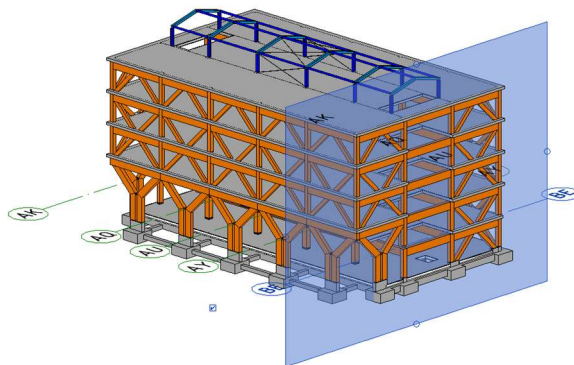


Figuur 34: As AK

De twee middelste kolommen lopen de sterke as van de profielen in dezelfde richting als de zijgevel. Dit is gedaan zodat de windbelasting goed opgevangen kan worden. Dit is niet nodig voor alle kolommen langs de zijgevel omdat de zijgevel een kruisverband op de begane grond heeft en daardoor er een goede krachtsafdracht voor de windbelasting plaatsvindt.

Vanwege een grote kniklengte van de midden kolom op de begane grond wordt er een tussen ligger geplaatst op 4m hoogte. Hiermee wordt de kolom minder gevoelig op knik en had anders een groot profiel nodig.

11.4.2 Toetsing zijgevel (as BE)



Figuur 35: As BE

De rechterzijgevel is op dezelfde manier als de andere zijgevel getoetst. Het verschil bij deze zijde is dat er een extra verdieping is waardoor de reactie krachten groter worden. Daarbij hebben de kolommen op de begane grond daardoor een kleinere kniklengte dan de kolommen van de andere gevel wat gunstiger is voor de kniktoets.

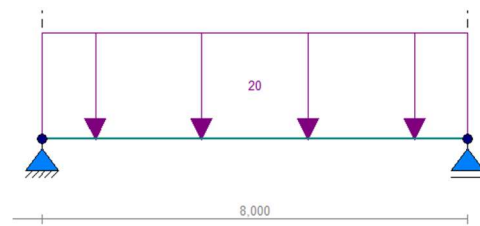
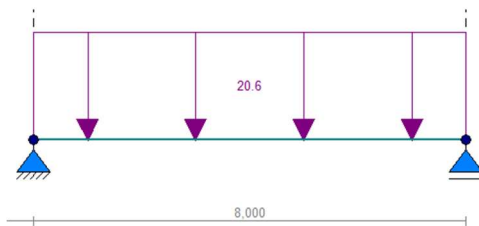
11.4.3 Toetsing tussenliggers

De tussenliggers worden als ligger op twee steunpunten berekend omdat de liggers aan beide kanten scharnierend worden bevestigd en geen momenten kunnen opnemen. De ligger wordt op dezelfde manier belast als de andere stramienen. Er zullen dus twee vloeren met een overheersende belasting worden berekend en de tussenligger moet hieraan voldoen. De ligger is een HEA 450.

Belastingen

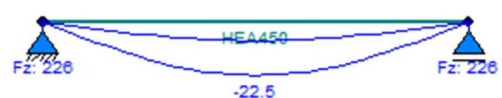
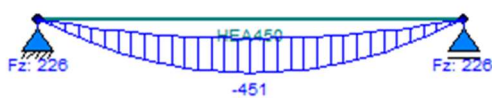
$$q_p = 4,0 \text{ m} \times 5,15 \text{ kN/m}^2 = 20,6 \text{ kN/m}$$

$$q_v = 4,0 \text{ m} \times 5,0 \text{ kN/m}^2 = 20,0 \text{ kN/m}$$

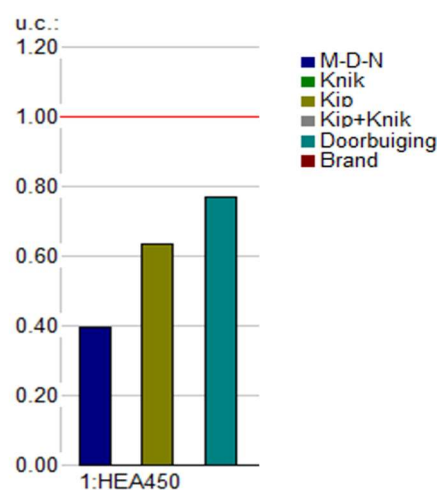


Figuur 36: Permanente en veranderlijke belasting

Hieruit komt de omhullende momentenlijn en doorbuiging:



De unity check van het profiel is hieronder weergegeven. Het profiel voldoet en de maatgevende factor is doorbuiging wat nog binnen de toegestane limiet van 24 mm valt.

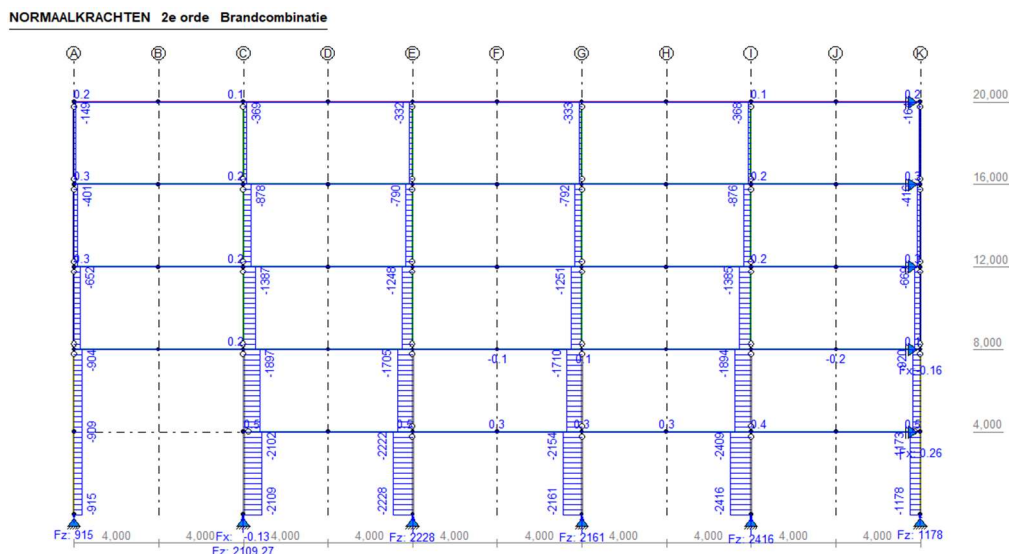


11.5 Toetsing brandveiligheid

Met behulp van het programma Brawesta zijn de stalen profielen getoetst op brandveiligheid met de belastingcombinatie voor brand benoemd in hoofdstuk 6.6. Waarbij de permanente belasting met een factor 1 wordt berekend en de veranderlijke belasting momentaan met de partiele factor γ_{m2} . Dit is vanwege de geringe veranderlijke belasting die tijdens een brand zou optreden. Met het programma Technosoft is zijn de normaalkrachten en momenten van de brandcombinatie berekend en daarmee de brandveiligheid toets gecontroleerd.

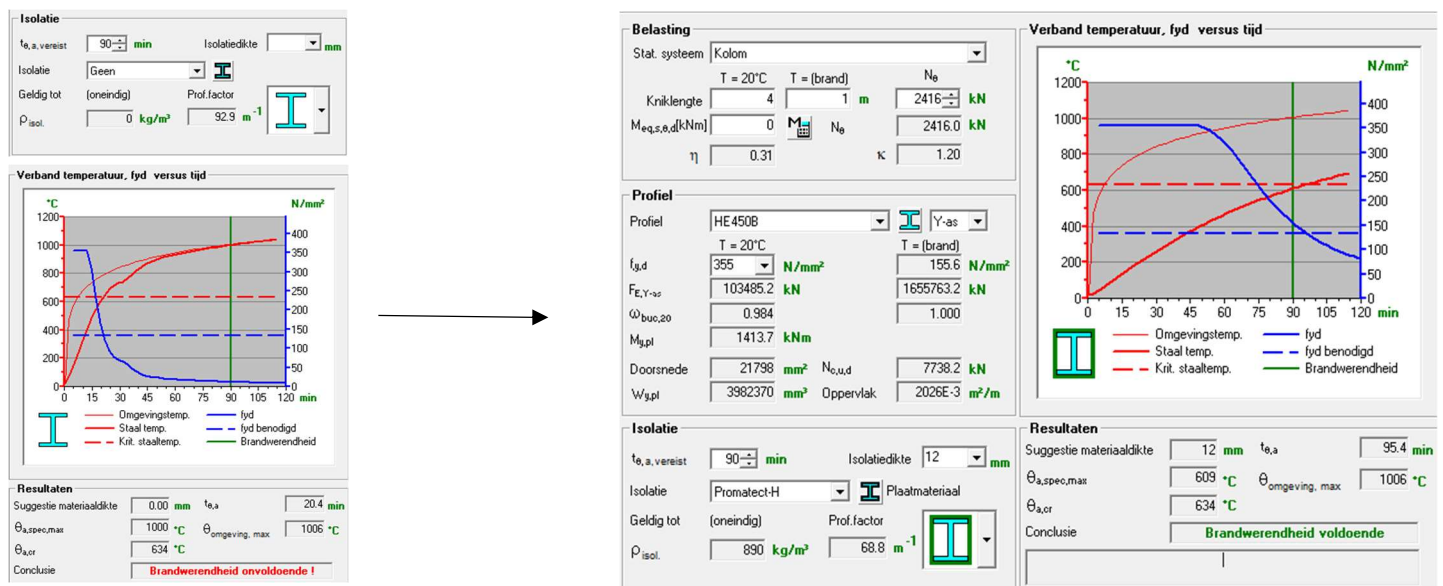
11.5.1 Brandwerendheid kolommen

De middelste strook in het gebouw (as 96) treden de grootste normaalkrachten op. Als er brand optreedt zijn de middelste kolommen het meest kwetsbaar omdat het moeilijk bereikbaar is voor brandweertieners en dat het lang kan duren totdat er in het midden geblust kan worden. Er wordt dus eerst gekeken naar deze kolommen en getoetst of de kolommen voldoen op brandveiligheid. De eis voor brandwerendheid is 90 minuten zoals beschreven in hoofdstuk 6.6. Dit project maakt gebruik van houten vloeren en de vuurbelasting is dusdanig hoger dan 500 MJ en er is geen mogelijkheid voor reductie in brandwerendheidstijd en blijft deze waarde op 90 minuten.



Figuur 37: Normalkrachten van de brandcombinatie

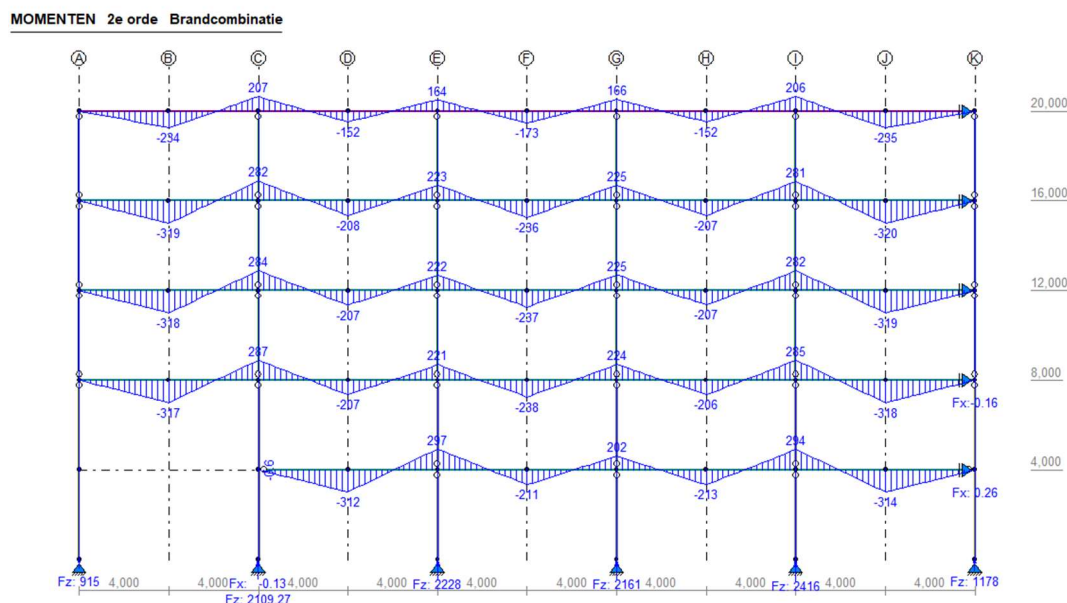
De grootste optredende brandsituatie op de kolommen is een waarde van 2416 kN. Dit is een HEB 450 met een staalkwaliteit van 355 N/mm². Met de tool van Brawesta concludeert dat zonder bescherming de kolom niet voldoet aan de 90 minuten brandwerendheid eis. Als er dus een 12mm Promatec-H bescherming plaat wordt toegepast dan voldoet de kolom wel. De brandwerende panelen worden ook als holle bekleding gemaakt omdat het makkelijker is te realiseren en omdat er meer ruimte tussen de platen en het profiel zit geeft dit een betere isolatie waardoor de brandwerendheid verbeterd wordt. Dit wordt dan toegepast voor de rest van de HEB 450 van de binnenste kolommen.



Figuur 38: Brandwerendheid zonder isolatie

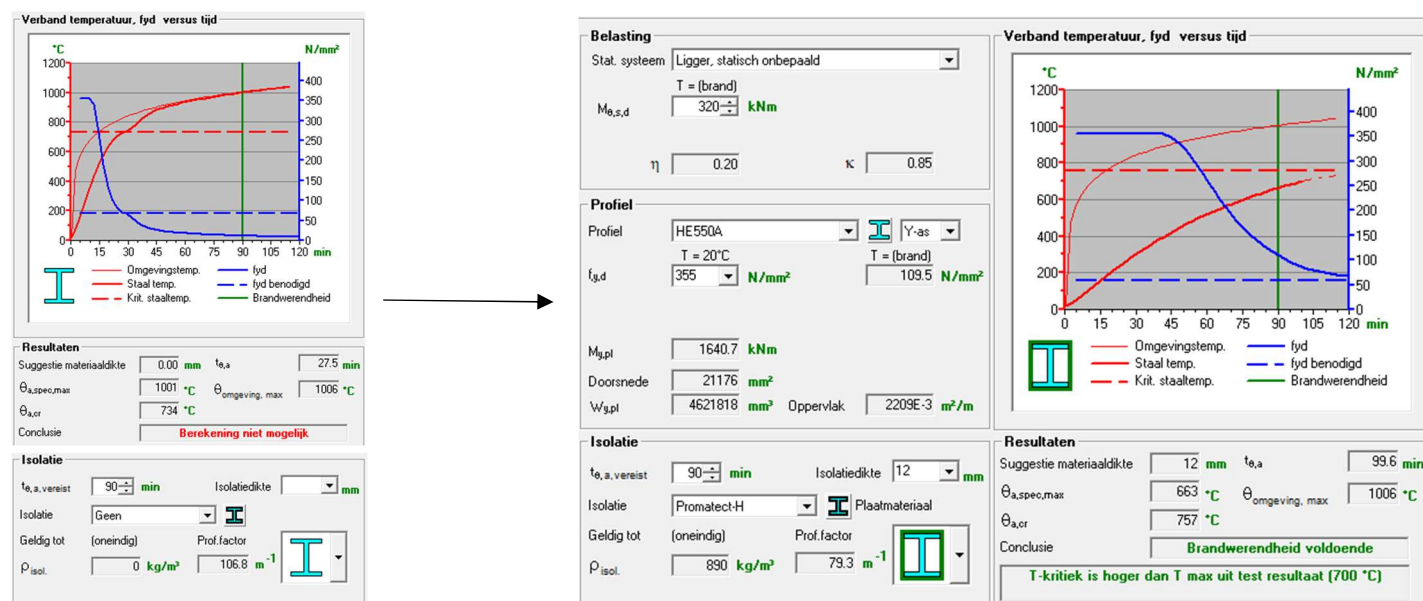
11.5.2 Brandwerendheid liggers

Voor de liggers wordt de brandwerendheid getoetst rekening gehouden met het maximale moment. De liggers zijn HEA 550 profielen en het grootst optredend moment is 320 kNm.



Figuur 39: Momenten van de brandcombinatie

Net zoals bij de berekening van de kolom voldoet de ligger zonder bekleding niet. Als er Promatect-H platen worden gebruikt van 12 mm dan voldoet de ligger aan de eisen.



Figuur 40: Brandwerendheid zonder isolatie

11.5.3 Brandwerendheid overige profielen

De overige profielen moeten ook allemaal bekleed worden. Er zouden maatregelen genomen kunnen worden om de brandwerendheid eisen te verlagen. Dit kan alleen als de brandbaarheidsgraad per vierkante meter kleiner is dan 500MJ/m². Dit is vergelijkbaar met 25 Kg aan vurenhout. De CLT vloeren wegen al meer dan 130 KG/m². Het is dus niet mogelijk om de brandwerendheid eis naar 60 minuten te verlagen.

Alles moet bekleed worden dus esthetische waarden gaat omlaag maar het verbergt wel alle boutverbindingen. Daarnaast kunnen installaties verwerkt worden in de bekleding en bekleding kan hergebruikt worden.

11.6 Toetsing initiële scheefstand Y-kolom.

Om de constructieve veiligheid van de Y-vormige kolom te kunnen waarborgen, wordt er naast de computerberekening ook een handberekening gemaakt. Hierbij wordt gecontroleerd of door initiële scheefstanden en vooruitbuigingen de originele kniktoets nog voldoet. Er worden dus: een fictieve horizontale belasting en een q-last berekend en daarmee wordt de kolom als simpele ligger op 2 steunpunten getoetst. Dit wordt gedaan op beide assen van het profiel, maar de zwakke as is maatgevend. Om het rapport beknopt te houden, zal alleen deze berekening worden toegelicht. De gehanteerde norm is: NEN-EN 1993-1-1.

De eerste toets wordt de hoekverdraaiing bepaald en met de normaalkracht worden er 2 horizontale krachten gemoduleerd. De 2^{de} toets wordt de doorbuiging bepaald die ontstaat uit de normaalkracht en hiermee kan er een fictieve q-last opgesteld worden.

Knikkromme bepalen

HEB340 => hoogte/breedte verhouding $\frac{h}{b} = \frac{340}{300} = 1,13 < 1,2$

Knikkromme klasse: C $i_z = 79$

Knikkromme c $\rightarrow \alpha = 0,49$

Doorsnedeklasse: 1

Slankheid:

$$\lambda_1 = \pi * \sqrt{\frac{210000}{355}} = 76,41$$

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{CR}}{i_z} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{4000}{79} \cdot \frac{1}{76,41} = 0,662$$

Moment- en Normaalkracht weerstand:

$$M_{crd} = f_y \cdot W_{z,el} = 355 \cdot 1280 \cdot 10^3 = 454,4 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$N_{crd} = A \cdot f_y = 17090 \cdot 355 = 6067 \cdot 10^3 \text{ N}$$

$$e_0 = \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) \cdot \frac{M_{crd}}{N_{crd}}$$

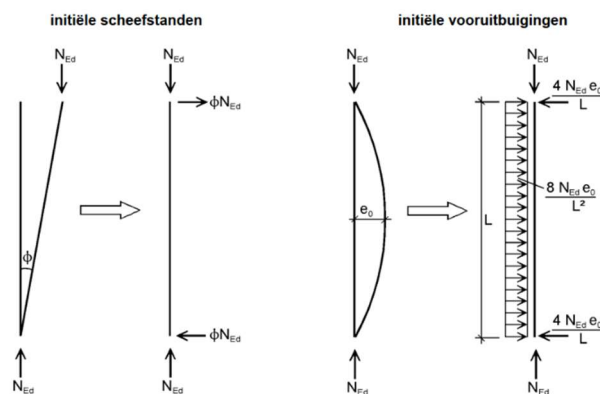
Maximale Amplitude e_0

$$e_0 = 0,49 \cdot (0,662 - 0,2) \cdot \frac{454,4 \cdot 10^6}{6067 \cdot 10^3} = 16,95 \text{ mm}$$

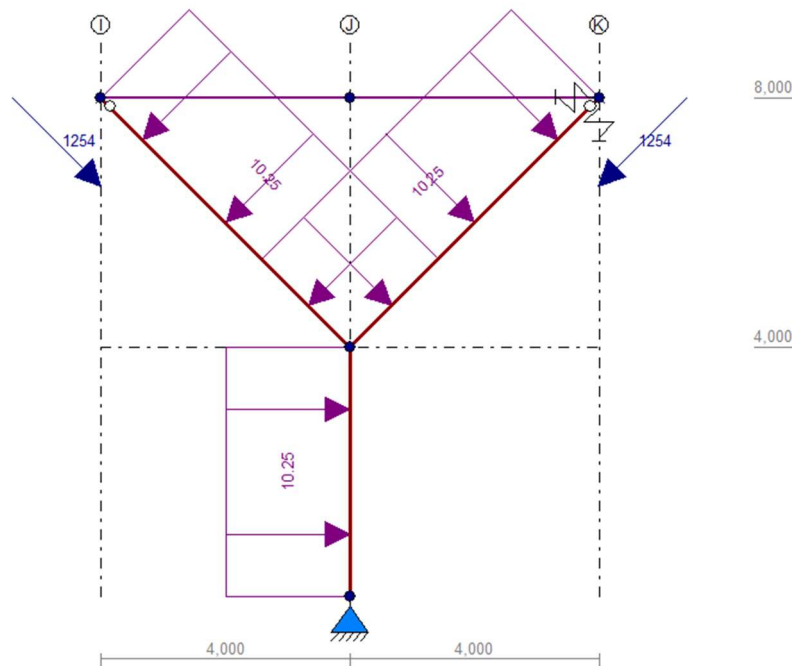
$$q = \frac{8 \cdot N_{ed} \cdot e_0}{l^2} = \frac{8 \cdot 1207 \cdot 0,017}{4^2} = 10,25 \text{ kN/m}$$

De q-last schuin op de kolom moduleren:

Waarbij $N_{ed} = 1254 \text{ KN}$

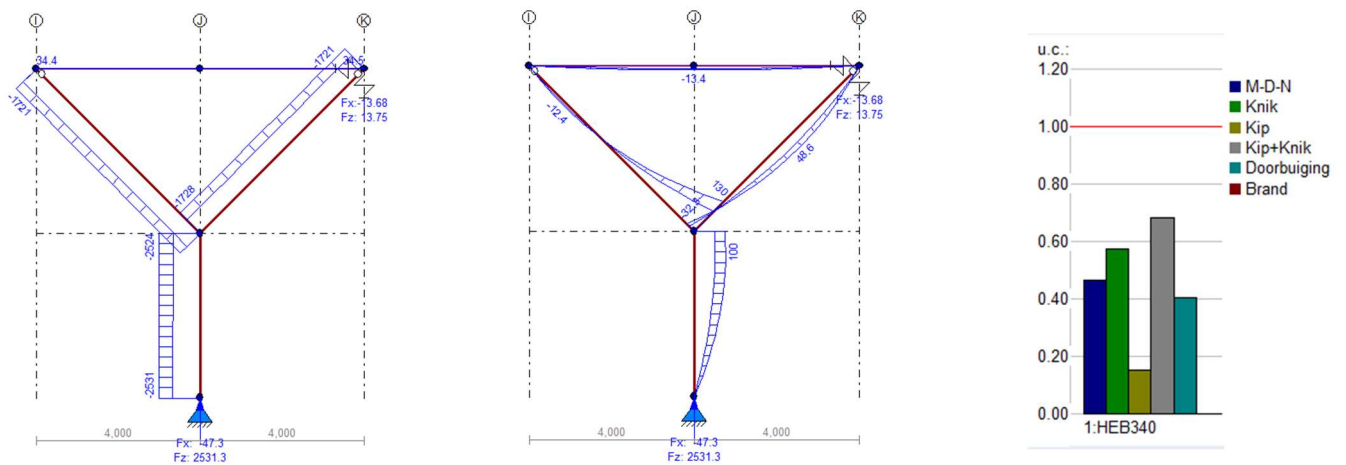


Figuur 41 (Vervanging van de initiële imperfecties door equivalente horizontale krachten volgens de NEN-EN 1993-1-1)



Figuur 43: Mechanica schema initiële scheefstand

Hieruit volgt een normaal kracht van 2531 kN voor de onderste kolom en een maximaal optredend moment van 130 kNm. Dit valt binnen de maximale capaciteit van de kolom en dit is ook te zien in de unity check wat niet hoger dan 1,0 is. De kolom voldoet aan de eisen³.



Figuur 42: Normalkracht, momentenlijn, en unity check

³ Op een later stadium is er een toevoeging geweest aan de berekening waar de onderste kolom met een kniklengte van 9,66 meter wordt berekend i.p.v. 4 meter. Deze lengte is de gehele lengte van de verticale kolom (4m) met de schuine kolom opgeteld (5,66m). Hieruit kwam dat de profiel vergroot moest worden naar een HEB 500.

12 Varianten beton

Voor de verschillende betonvarianten zal eveneens rekening worden gehouden met het gebruik van CLT-vloeren, vanwege de aanzienlijke CO₂-uitstoot geassocieerd met beton. Het toepassen van zowel een betonnen draagconstructie als een betonnen vloer resulteert in een dusdanig hoge CO₂-uitstoot dat het in vergelijking met de eerdere varianten op het gebied van duurzaamheid aanzienlijk tekortschiet. Daarbij hebben CLT-vloeren een gunstigere permanente belasting wat helpt bij het optimaliseren van de profielen.

Bij de voorgevel van het huidige ontwerp zijn er veel schuine schoren toegepast. Dit is goed uitvoerbaar met hout of staal maar voor beton is het vrij onpraktisch omdat er trek kan ontstaan in de schoren en daar is beton niet geschikt voor. Daarbij zouden de schoren zwaar gewapend moeten worden. Daarbij zouden de betonnen schoren veel extra eigengewicht toevoegen waardoor de gehele draagconstructie zwaarder zou worden.

Er zijn eerdere varianten gemaakt van beton waarbij er een boomstructuur wordt toegepast waar de schoren onder een minder schuine hoek komen te staan vergeleken met de originele variant. Hierdoor zullen er minder snel trekkrachten optreden in de schoren. Dit heeft wel als nadeel dat het hele originele concept veranderd wordt en er dus niet een realistische vergelijking van gemaakt kan worden.

12.1 Variant staal + beton

Om een efficiënt ontwerp te kunnen maken kan er een ontwerp combinatie van staal en beton opgesteld worden. Hierbij worden de schoren en de liggers van staal gemaakt en de Y-vormige kolommen van beton. De Y-kolommen zouden dan geprefabriceerd kunnen worden.

Het zou ook een mogelijkheid zijn als de kolommen in de middelste beuken van beton gemaakt worden. De rest van de draagconstructie onderdelen worden van staal gemaakt, dus de berekeningen van het vorige hoofdstuk geld ook voor de middelste beuken van de beton variant.

12.1.1 Y-vormige kolommen beton

De Y vormige kolommen worden geprefabriceerd met C45/55 beton vanwege het ontkisten in de fabriek. De keuze voor prefab beton gaat voor. Dit wordt gedaan aangezien er zeven stuks gemaakt moeten worden daarbij ziet het er esthetisch er beter uit. Daarbij kunnen er rondingen gemaakt worden waar de kolom zich vertakt zodat de knoop nog beter de momenten kan opnemen. De Y-vormige kolom wordt in SCIA-Engineer getekend ter controle van de constructieve veiligheid en voor de knik berekening. Hierbij wordt er gekeken wat de benodigde wapening voor de kolom is.

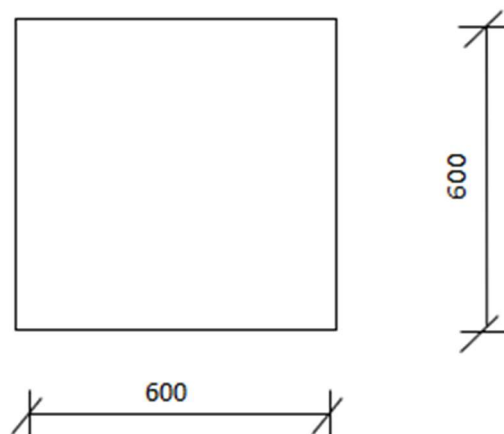
Voor de wapening berekening wordt de NEN-EN-1992 aangehouden. De relatieve slankheid van de kolom wordt berekend en getoetst op de bijbehorende eisen.

12.2 Toetsing betonnen kolommen

Om een constructief veilig ontwerp te kunnen opstellen, worden de betonnen kolommen getoetst aan de veiligheid normen. Bij de volgende berekeningen zal er gekeken worden wat de benodigde kolom afmetingen zullen zijn en wat voor wapening toegepast moet worden, rekening houdend met beugels en langs wapening.

12.2.1 Dimensies kolom

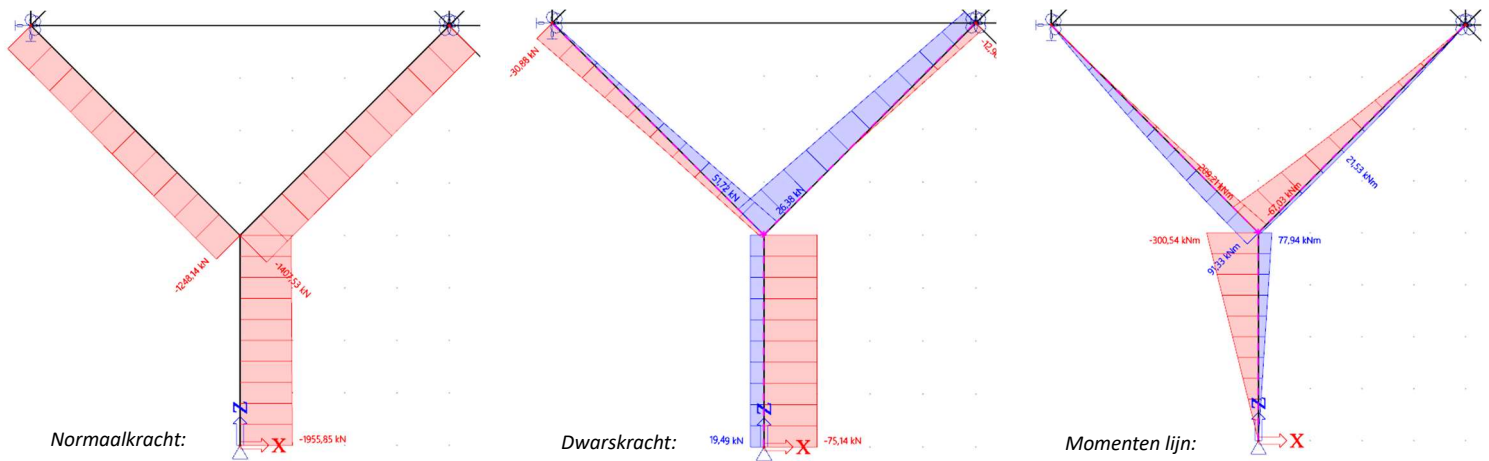
Voor de kolom dimensies wordt een aanname van mm bij 600 x 600 mm genomen. Dit is omdat in de knoop er grote momenten optreden en er anders niet genoeg ruimte is om de wapeningstaven te kunnen laten passen. De uiteindes van de kolom zijn verjongd naar 500 x 600 mm op de begane grond en bij de gevel ligger.



Figuur 44: Afmetingen betonnen kolom

12.2.2 Wapening berekening

Bij de wapening berekening zal er getoetst worden wat de benodigde wapening voor de kolom is. In bijlage II staan de gemaakte wapening berekeningen. Met technosoft en SCIA engineer zijn de benodigde berekeningen gemaakt voor het maximale moment, normaalkracht en dwars kracht. Vervolgens is er gekeken bij welke Y-vormige kolom deze waardes maatgevend waren. Dit is bij de uiterste kolommen en deze worden ook getoetst.



Figuur 45: Normaalkracht, Dwarskracht en Momentenlijn van de Y-kolom

Voor de wapeningberekening worden de volgende onderdelen behandeld: buigwapening, langswapening, beugels, scheurwijdte, dwarskracht en controle op slankheid van de kolom.

Voor de buigwapening is berekend dat de kolom minimaal moet worden gewapend met 10-Ø25, wat neerkomt op 5-Ø25 per zijde. Vervolgens wordt bepaald of de slankheid van de kolom voldoet. Hierbij wordt de benodigde wapening voor de kolom met de normaalkracht- en momentcombinatie berekend. Uit deze berekening blijkt dat er geen zwaardere wapening nodig is dan voor de buigwapening is berekend.

Voor de langs wapening wordt 3-Ø16 toegepast, waarna de benodigde beugels worden berekend. Hieruit volgt dat de minimale beugelwapening Ø10-250 mm moet zijn. Vervolgens wordt de scheurwijdte gecontroleerd, waarbij de staalspanning wordt geëvalueerd om de maximale staafdiameter en staafafstand te bepalen. De berekende diameter is 14,5 mm, wat kleiner is dan de toegepaste staafdiameter. De maximale staafafstand bedraagt 140 mm, terwijl de gebruikte h.o.h.-afstand van de staven 127 mm is, dus voldoet deze toets. Het is vereist dat ten minste één van deze toetsen voldoet. Tot slot wordt de maximale dwarskrachtcapaciteit berekend, wat resulteert in een waarde van $V_{rd}=312,5$ kN

In bijlage IV staan de wapening tekeningen van de betonnen kolom.

13 Variant vergelijking

Met de uitwerking van het gehele gebouw kunnen nu de varianten met elkaar worden vergeleken en kunnen de bijbehorende milieu prestaties tegen elkaar worden afgewogen. Met de gemaakte varianten wordt berekend wat de bijbehorende EPD, MKI en MPG scores zijn. Bij elke prestatietoetsing wordt gekeken naar de draagconstructie en de vloeren. Andere gebouwoonderdelen zoals installaties, glazen gevels en inbouw worden niet in de berekening meegenomen, omdat deze waarden niet of minimaal verschillen tussen de varianten. Dit wordt gedaan om de berekening zo zuiver mogelijk te houden met betrekking tot de constructieve elementen.

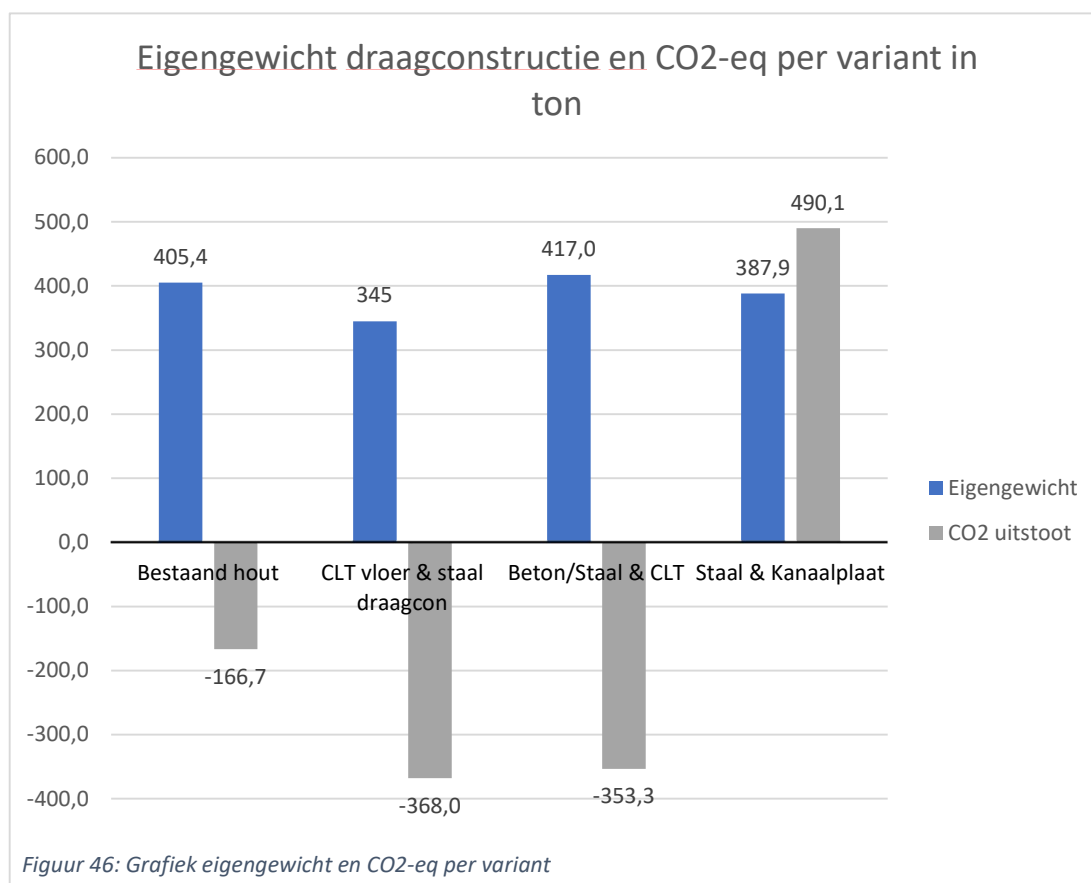
13.1 EPD berekening

Met de Environmental Product Declaration van de bouwoonderdelen wordt er berekend wat de totale CO₂- uitstoot equivalent per variant bedraagt. Het is echter belangrijk op te merken dat de EPD-berekeningen weliswaar een indicatie geven van de hoeveelheid uitgestoten of opgeslagen CO₂. Zoals te zien is hebben de varianten met CLT- vloeren een uitermate betere CO₂ uitstoot dan de bestaande constructie. Dit komt door de hoge 'carbon capture' oftewel van houten constructie methodes. Er wordt als dusdanig veel CO₂ opgeslagen door hout toe te passen.

Het is echter belangrijk op te merken dat de EPD-berekeningen weliswaar een indicatie geven van de hoeveelheid uitgestoten of opgeslagen CO₂, neemt deze berekening niet het optimaal gebruik van hout mee. Als de hoeveelheid aan volume hout toeneemt gaat de totale CO₂ uitstoot omlaag omdat hout een negatieve waarde heeft van -621 kg CO₂ eq/m³. Dus simpelweg gezegd hoe meer hout wordt gebruikt, hoe beter het is voor de CO₂ opname.

Dit is wel tegenstrijdig met het duurzaamheidsbeeld dat houtbouw met zich mee brengt, want als er onnodig veel hout wordt toegepast betekent dit dat er daarvoor meer bomen gekapt moeten worden wat juist vermeden moet worden. Als deze duurzaamheidstoetsing een gestandaardiseerde methode zou worden dan zou dit kunnen betekenen dat partijen onnodig hout kunnen toepassen ter compensatie van andere bouwoonderdelen om bepaalde milieudoelen te bereiken. Persoonlijk ben ik van mening dat de EPD berekeningen geen geschikte methode is om varianten en gebouwen met elkaar te vergelijken zodra er hout wordt gebruikt in de constructie.

Onderdeel	HOUT + KANAALPLAAT	STAAL + CLT	BETON Y + STAAL+ CLT	STAAL + KANAALPLAAT
	Bestaand hout	CLT vloer & staal draagcon	Beton/Staal & CLT	Staal & Kanaalplaat
CO ₂ Draagcons in ton	-460	175	190	197
CO ₂ vloeren	293	-543	-543	293
Totaal co2 in ton	-167	-368	-353	490



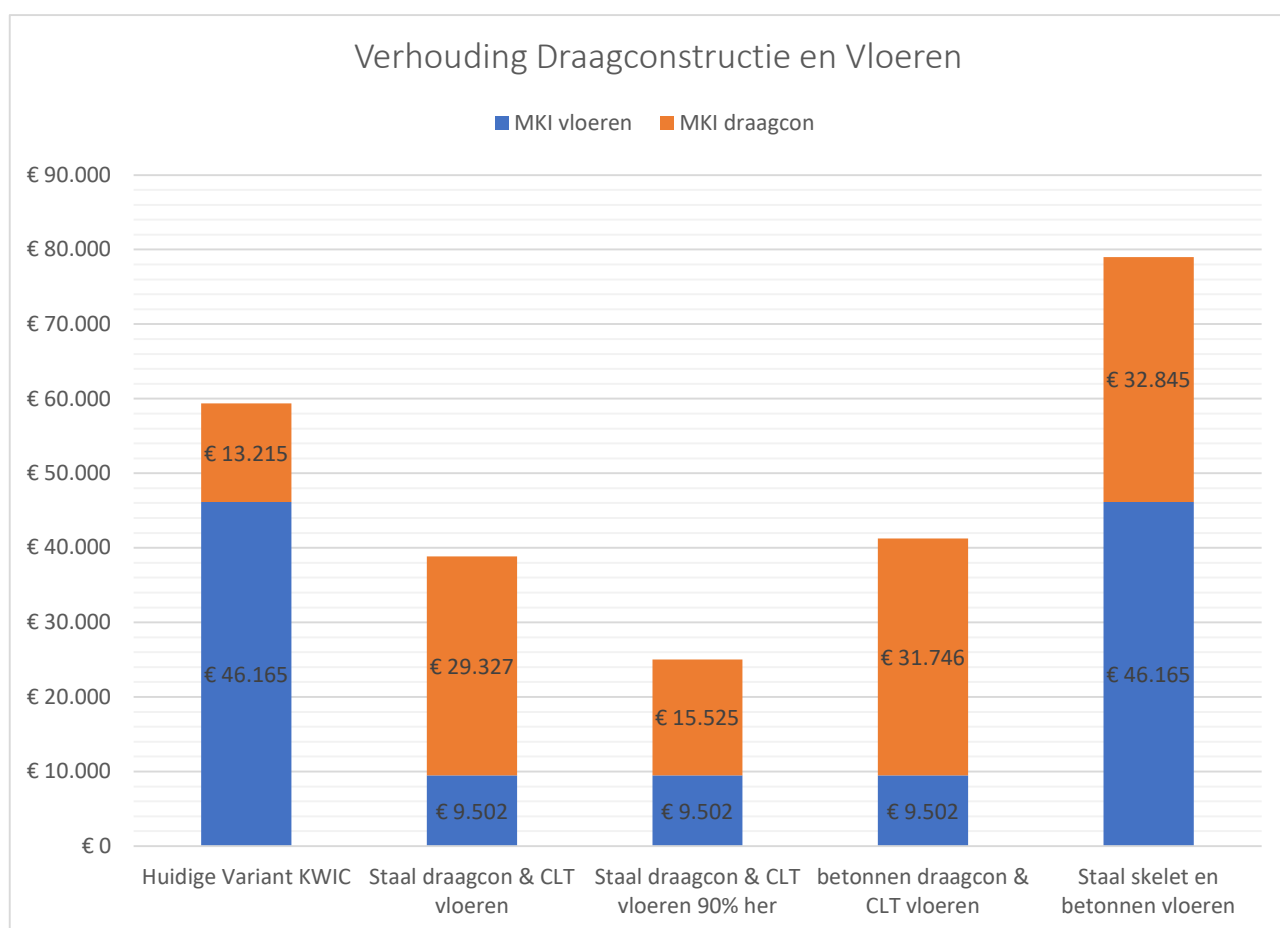
13.2 MKI berekening

In Bijlage VI zijn de berekeningen van de MKI en MPG per variant opgesteld, hierbij zijn MKI waarden volgens de NMD (Nationale Milieu Database) gehanteerd. Met de Excel profiellengte berekeningen worden de materiaal hoeveelheden berekend en daarmee kan de totale MKI score per onderdeel bepaald worden. In de MKI en MPG berekening wordt ook een sub variant van de stalen variant gemaakt waarbij een MKI waarde wordt gebruikt voor zwaar profielstaal dat staal voor 90% hergebruikt wordt. Realistisch is dit moeilijk om dit percentage aan profielstaal te hergebruiken maar het is puur om aan te duiden wat het effect is van totaal demonteerbaar ontwerpen. De variant met een stalen draagconstructie is zo demontabel mogelijk ontworpen door voornamelijk gebruik te maken van boutverbindingen, maar een hergebruik van 60% van de profielen komt meer overeen met de werkelijkheid.

Het KWIC heeft een totale MKI score van 59.379 €. Waarvan 22% de draagconstructie bedraagt en 78% de vloeren⁴. De vloeren hebben een overheersende bijdrage aan de totale MKI scores. Als dit wordt vergeleken met de stalen variant met CLT vloeren komt er uit dat de draagconstructie een percentage van 75% van de totale MKI score heeft en een uiteindelijke MKI score van 38.830 €. Dit is een significant minder dan het huidige gebouw en hiermee is te zien dat de vloerkeuze een maatgevend aandeel heeft met de totale MKI score. De stalen draagconstructie heeft wel meer uitstoot dan de bestaande houten draagconstructie. Dus idealiter op thema duurzaamheid wordt een combinatie van een houten draagconstructie en houten vloeren gebruikt, maar naast dat het erg prijzig kan zijn was dit niet mogelijk om de voor het KWIC uitvoeren.

De betonnen variant komt overeen met de stalen variant, de reden hiervoor is omdat voornamelijk de Y-kolommen met beton zijn ontworpen en de rest van de draagconstructie van staal is gemaakt.

Als laatst is de combinatie van een stalen skelet en betonnen kanaalplaat vloeren berekend. Deze variant scoort het minst goed op de totale MKI score. Voor de draagconstructie zijn zwaardere profielen toegepast omdat de kanaalplaatvloeren een hoger eigengewicht hebben vergeleken met CLT vloeren.



Figuur 47: grafiek MKI berekening varianten

⁴ Toevoeging: de MKI score voor VBI kanaalplaat vloeren zijn berekend met VBI groene vloeren. VBI heeft veel duurzaamheidsinformatie van de normale 'grijze' kanaalplaatvloeren teruggetrokken die een hogere MKI score hebben. In werkelijkheid zal de MKI berekening voor de betonnen vloeren dusdanig nog hoger liggen dan bij deze berekening aangezien de groene kanaalplaatvloeren zelden gebruikt worden.

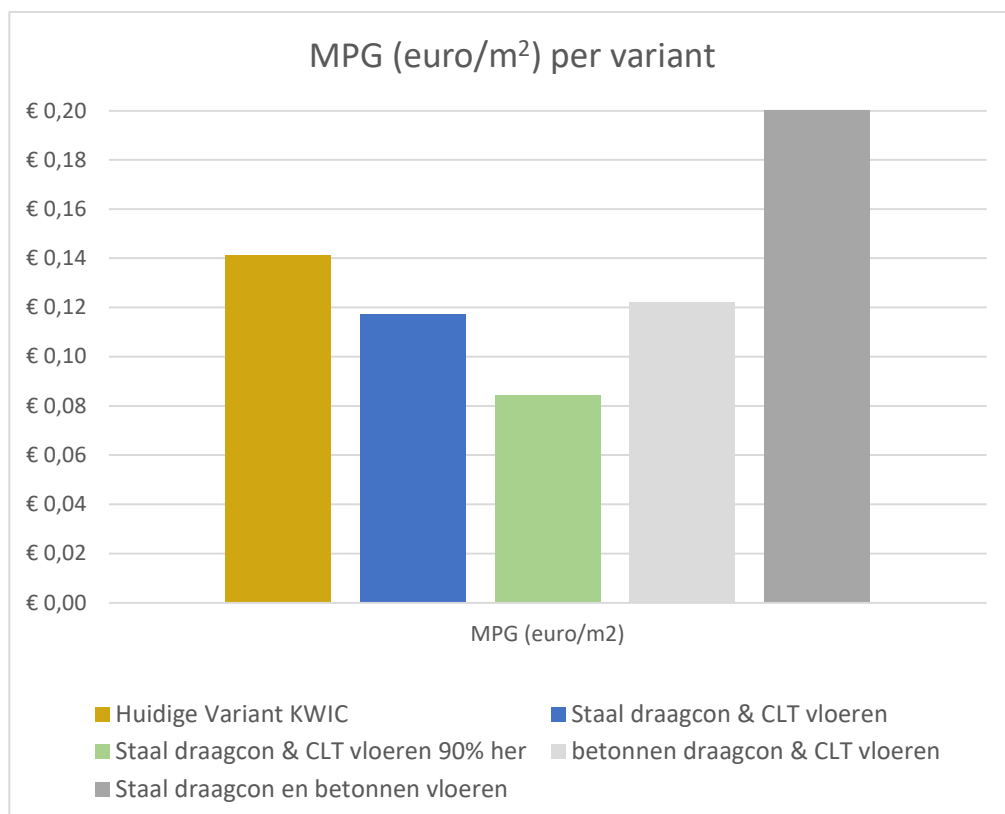
13.3 MPG berekening

Zoals eerder vermeld bij hoofdstuk 9 MPG & MKI, wordt er in de MPG berekening de levensduur en bruto vloeroppervlakte ook meegenomen in de milieuprestatie berekening. Hierdoor kan er een makkelijke vergelijking tussen verschillende gebouwen gemaakt worden omdat de berekening op basis van vierkante meter vloeroppervlakte is gemaakt.

Voor het Koning Willem I College wordt de bruto vloeroppervlakte berekend volgens de NEN 2580 en heeft een totale oppervlakte van 4199 m².

Met de MKI berekening kunnen de varianten naar MPG scores berekend worden. Zoals weergegeven in figuur 48 grafiek MPG berekening, hebben de waardes zoals berekend bij de MKI berekening veel gelijkenis. Er is wel op te merken dat het verschil in MPG scores tussen het bestaande gebouw en de stalen variant minder groot is. Dit komt vanwege de minder lange levensduur van de Fermacel en Promatec brandpanelen wat een direct effect heeft op de MPG berekening.

Daarbij scoort de staal en kanaalplaatvloer variant verreweg het slechts met een MPG score van 0,20 euro. Als de constructie daarentegen met CLT vloeren wordt ontworpen en de staal profielen grotendeels hergebruikt kunnen worden heeft dit net zoals de MKI berekeningen een positief effect op de duurzaamheid.



Figuur 48: Grafiek MPG berekening

13.3.1 Duurzaamheid

De EPD, MKI en MPG berekeningen zijn methoden om de uiteindelijke duurzaamheid van het gebouw te beoordelen. Het is echter belangrijk op te merken dat andere factoren, die moeilijker te meten zijn, ook aanzienlijke invloed kunnen hebben op de totale duurzaamheid van het gebouw. Onder andere de: esthetiek en gebruiksflexibiliteit van het gebouw. Goed geoogde gebouwen zijn niet altijd materiaal efficiënt ontworpen en dit resulteert in een slechte duurzaamheid score op korte termijn. Maar de gebouwen zullen vele malen langer meegaan en onderhouden worden dan minder 'mooie' gebouwen. Wat betekent dat het gebouw minder snel zal worden gesloopt en daardoor op de lange termijn een betere ecologische score heeft.

Gebouwen met een betere gebruiksflexibiliteit doorgaans een langere levensduur dan gebouwen met specifieke doeleinden. De kans is groter dat de gebouwen voor andere doeleinden gebruikt worden dan origineel bedacht waardoor de levensduur verlengd wordt. Aan deze punten kunnen niet makkelijk een bepaalde score aan gelinkt worden, omdat esthetiek vooral afhankelijk is van smaak. De esthetische waarde van het gebouw kan met een stalen draagconstructie wel achteruit gaan. Aangezien de profielen bekleed worden met brandpanelen worden minder goede verbindingen verborgen. De betonnen draagconstructie variant daarentegen zou van de gevel, de esthetiek verbeteren en daardoor de levensduur van het gebouw kunnen verlengen. De bestaande houten draagconstructie heeft een zeer mooie uitstraling die moeilijk te evenaren is door de stalen en betonnen varianten. Bij de CLT varianten zijn helaas de houten vloeren niet zichtbaar omdat de vloeren zoals boven en onder bedekt zijn, wat de esthetische waarde niet verbeterd.

14 Conclusie

Het bestaande Koning Willem I College te Den Bosch is opgebouwd uit een houten draagconstructie en betonnen vloeren. In het afstudeeronderzoek zijn verschillende varianten van de draagconstructie van het gebouw gemaakt waarbij ook de constructieve veiligheid wordt getoetst. Daarmee wordt onderzocht wat de milieuprestaties per variant zijn en welke onderdelen daar veel effect op hebben. De hoofdvraag van dit onderzoek luidt: *“Hoe zou de draagconstructie van het KWIC eruitzien als deze in staal of beton was uitgevoerd en wat voor effect dat heeft op de bijbehorende milieuprestatie-eisen?”* Waarbij de volgende deelvragen zijn beantwoord:

“Wat zijn de bouweisen van het gebouw en welke factoren moeten meegenomen worden?” Voor de varianten is er informatie vergaard over de bijbehorende bouweisen zoals: gevolgklasse, belastingen, belasting combinatie, maximale vervorming, maximale verplaatsing en brandveiligheid. De varianten voldoen aan de eisen en er is rekening gehouden met de realisatie ervan.

“Hoe komt het ontwerp eruit te zien als het in staal of beton wordt uitgevoerd?” De stalen variant heeft een geheel stalen skelet met CLT-vloeren. De achtergevel en zijgevels bevatten kruisverbanden die horizontale krachten kunnen opnemen. De voorgevel heeft een geringe horizontale krachtafdracht en dit wordt opgelost door middel van schijfwerking van de vloeren die de stabiliteit borgen. Het onderste deel van de Y-vormige kolom is als enkele kolom uitgevoerd in plaatst van dubbel zoals bij het bestaande gebouw. De vertakking van de Y-kolom is moment vast. De verbindingen zijn zo demonteerbaar mogelijk ontworpen door boutverbindingen toe te passen om de duurzaamheid te verbeteren.

De betonnen variant heeft naast de Y-kolommen dezelfde bovenbouw als bij de stalen variant. Om het architectonische beeld te behouden, worden de schoren niet weggelaten. Het realiseren van schoren in beton bleek echter zeer onpraktisch, daarom is er gekozen voor een combinatie van staal en beton. De Y-vormige kolommen zijn geprefabriceerde betonnen kolommen met een kwaliteit van C45/55.

“Voldoet de variant aan de eisen en is het constructief veilig?” De toetsingen zijn uitgevoerd met de softwareprogramma's Technosoft en SCIA Engineer. Hierbij worden alle onderdelen getoetst waarbij de unity check 0,7 of lager bedraagt. Dit is een bewuste ontwerpkeuze, zodat verbindingen eenvoudiger gerealiseerd kunnen worden, waarbij ook een extra veiligheidsmarge wordt meegenomen.

“Kan het ontwerp aangepast worden om de keuze van de profielen te optimaliseren?” Het gebruik van CLT vloeren bevordert de draagconstructie omdat CLT-vloeren minder eigengewicht hebben. De liggers parallel aan de voorgevel van het gebouw worden doorgetrokken zodat dit de uiteindelijke doorbuiging van de liggers reduceert.

“Wat is de impact op het milieu van het gebruik van andere materialen?” Bij de beoordeling van de milieuprestaties is de keuze van de vloer een cruciale factor om de duurzaamheid van het gebouw te bevorderen. Dit komt door de aanwezige vloeroppervlakte. Het gebruik van CLT voor de vloeren en een stalen draagconstructie is duurzamer dan betonnen kanaalplaatvloeren en een houten draagconstructie, mits er tussenliggers bij de CLT vloeren worden geplaatst om de overspanning te verkleinen. Het is uitdagend om met enkel de draagconstructie dezelfde CO₂-opname te bereiken als bij CLT-vloeren en de uitstoot van kanaalplaatvloeren is een maatgevende factor hierin. De keuze voor CLT-vloeren en een houten draagconstructie was binnen Pieters Bouwtechniek afgefallen, omdat dit niet kostenefficiënt en niet haalbaar was gezien de totale verdiepingshoogte. Bij een stalen draagconstructie kunnen de profielen tot kleinere hoogtes worden teruggebracht in vergelijking met een houten draagconstructie, waardoor de totale verdiepingshoogte niet wordt gecomprimeerd.

Hoewel het gebruik van een stalen draagconstructie het totale eigen gewicht vermindert, gaat dit gepaard met een toename in CO₂-uitstoot. Het gebruik van CLT-vloeren compenseert voor de extra uitstoot van de draagconstructie, aangezien de vloeren een substantiële bijdrage leveren aan de totale CO₂ uitstoot op projectniveau. Het is belangrijk om op te merken dat de demonteerbaarheid van een stalen draagconstructie aanzienlijke invloed heeft op de uiteindelijke duurzaamheid van het gebouw. Aangezien het gebouw een onderwijsfunctie vervult, zijn er specifieke vereisten op het gebied van brandveiligheid en geluidsisolatie van toepassing. Voor de stalen CLT variant moeten Promatec panelen op de draagconstructie worden toegepast om het gebouw 90 minuten brandveilig te maken en Fermacel panelen voor de trilling en geluidsisolatie.

Uit de: EPD, MKI en MPG berekeningen komt dat de CLT vloeren varianten beter scoren op de milieuprestaties. Daarbij is wel gezegd dat de EPD toetsing met de nodige voorzichtigheid beschouwd moet worden vanwege het niet meenemen van optimaal hout gebruik. Er zou ook dus mogelijke misbruik met deze berekening gemaakt kunnen worden om onnodig hout te gebruiken om een bepaald project een totale betere EPD score te geven.

In een wereld waar duurzaamheid en ecologische verantwoording steeds belangrijker wordt, moet er efficiënter en milieubewuster ontworpen worden. Als men in de bouwsector grote slagen wil maken op duurzaamheid zou er veel vaker gekozen moeten worden voor houten vloeren aangezien de vloeronderdelen op projectniveau een grotere CO₂ bijdrage heeft dan de draagconstructie. Voor dit project zou het voor de milieuprestaties beter zijn geweest om een stalen draagconstructie met houten vloeren te realiseren dan een houten draagconstructie met betonnen vloeren.

14.1 Aanbevelingen

Vanuit dit rapport zijn enkele punten naar voren gekomen die mogelijk nader onderzoek behoeven, aangezien ze buiten de afbakening van het project vielen.

- I. Een aanvullend onderzoek zou gericht kunnen zijn op het hergebruiken van kanaalplaatvloeren als een potentiële methode om duurzaamheid te bevorderen. Gezien het beperkte beschikbare onderzoek, wordt aanbevolen om een vervolgstudie uit te voeren om meer inzicht te verkrijgen in de haalbaarheid en effectiviteit van deze aanpak.
- II. Het wordt aanbevolen om een aanvullend onderzoek uit te voeren om de realisatiekosten van de varianten te analyseren. Hierbij kan worden vergeleken wat het verschil in uitvoeringskosten is en welke varianten kostenefficiënter blijken te zijn.
- III. Een verdiepend onderzoek naar de invloed van de verschillende varianten op de fundering van het gebouw en de mogelijkheid om daarmee ook de algehele milieuprestaties te bevorderen.
- IV. Hoe ontwikkelen de berekeningen van de Environmental Product Declaration (EPD) zich in de loop van de tijd? Momenteel bevinden de EPD-berekeningen zich nog in de beginfase, en er ontbreekt vaak achtergrondinformatie over veel waarden. Hoe vertaalt dit zich over 50 jaar, wanneer er waarschijnlijk wijzigingen zullen plaatsvinden in veel methoden voor de eindelevensfase?

15 Afkorting lijst

1.	KWIC	=	Koning Willem I College
2.	MPG	=	Milieu Prestatie van Gebouw
3.	DPG	=	Duurzaamheid Prestatie van Gebouw
4.	EPD	=	Environmental Product Declaration
5.	GWP	=	Global Warming Potential
6.	MKI	=	Milieu Kosten Indicator
7.	U.C.	=	Unity Check
8.	CLT	=	Cross Laminated Timber
9.	GLULAM	=	Glued Laminated Timber
10.	KWIC	=	Koning Willem I College
11.	NMD	=	Nationale Milieu Database

16 Bronnenlijst

1. Bouwwereld. (2022). Duurzaamheid begint met de juiste vloerkeuze. Bouwwereld.nl
<https://www.bouwwereld.nl/bouwtechniek/duurzaamheid-begint-met-de-juiste-vloerkeuze/>
2. Martinsons (2017) CLT panelen. Tabel overspanningen
<http://solidtimber.nl/wp-content/uploads/2019/09/Overspanningstabel-CLT-2017-04-28.pdf>
3. Bouwen met staal. (2022) Environmental Product Declaration. Zwaar constructiestaal, design for reuse,
https://www.bouwenmetstaal.nl/uploads/publicaties/1.1.00289.2022_MRPI-EPD_Zwaar_constructiestaal-design_for_reuse-overspanning_tot_25m-80Procent_hergebruik_FINAL_.pdf
4. Environmental Product Declaration van Cross Laminated Timber (CLT) Storaenso
<https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/186e4440-1809-4e7e-41b3-08d8dc8471b1/Data>
5. Harmonisation of the environmental product declarations for wood products (2023)
<https://www.proceedings.com/content/069/069179-0594open.pdf>
6. Duurzaamheidsprestaties onderwijsgebouwen MJA (2017)
<https://s3-eu-central-1.amazonaws.com/vakbladwarmtepompen.nl/app/uploads/2018/07/attachment-Eindrapport20Duurzaamheidsprestaties20onderwijsgebouwen20met20bijlagen.pdf>
7. Bouwen met bomen. (z.d.). SMV | Studio Marco Vermeulen.
<https://marcovermeulen.eu/nl/projecten/bouwen+met+bomen/>
8. Stichting Nationale Milieudatabase. (z.d.). *Nationale Milieudatabase | Milieuprestaties van bouwwerken*. NMD
<https://milieudatabase.nl/nl/>
9. Netherlands, S. (2023, September 8). *CO2 equivalents*. Statistics Netherlands.
<https://www.cbs.nl/en-gb/news/2019/37/greenhouse-gas-emissions-down/co2-equivalents>
10. Consolis VBI B.V. (2023, November 8). *Als basis: de kanaalplaatvloer - VBI*. VBI.
<https://vbi.nl/producten/uw-basis-de-kanaalplaatvloer/>
11. Interne werkrapporten Pieters Bouwtechniek.
12. Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties. (2023, October 4). *Analyse aanscherping MPG-norm*
<https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2023/07/31/eib-analyse-aanscherping-mpg-norm>

Gebruikte Software:

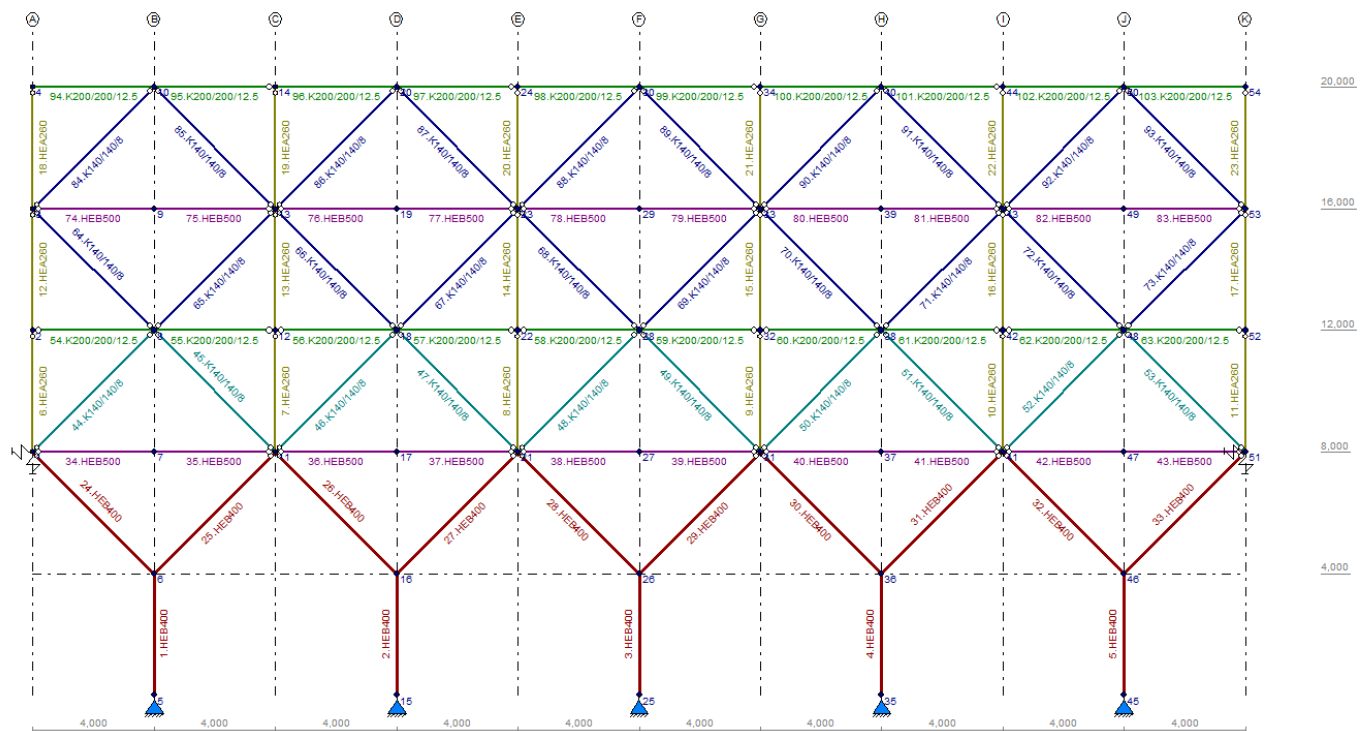
1. Technosoft.nl. (2023, December 21). Technosoft pakketten. *Constructieberekeningen software*.
<https://www.technosoft.nl/>
2. SCIA engineer. (2023). *Constructieberekeningen software*.
<https://www.scia.net/nl/scia-engineer>
3. Autodesk AutoCAD & Revit (2024) teken en ontwerp programma
<https://www.autodesk.nl/products>
4. Brawesta Matrix Software. (2023). *MatrixTools*.
<https://matrix-software.com/nl/structural-engineers/matrix-tools>

Bijlage I: toetsing varianten staal

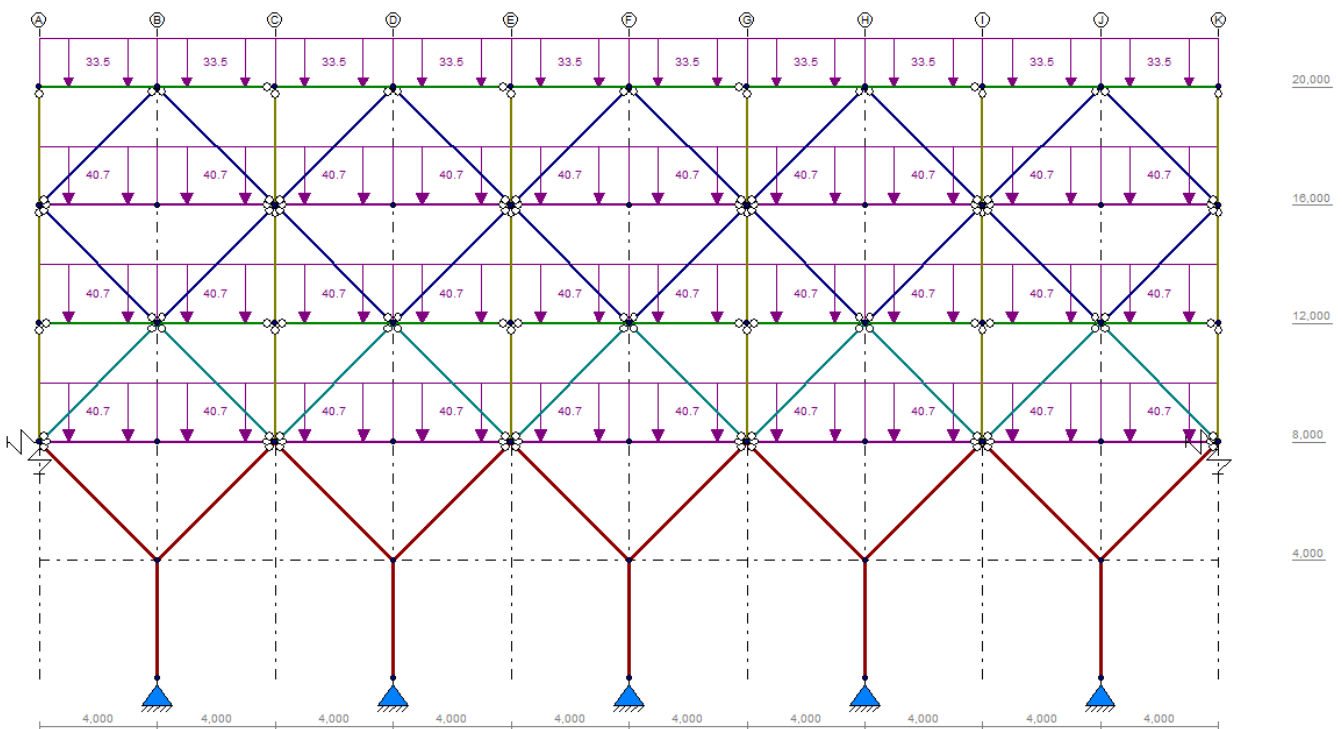
Variant 1

De wind belasting is in hoofdstuk 6.3.1.3 bepaald en wordt op alle varianten toegepast.

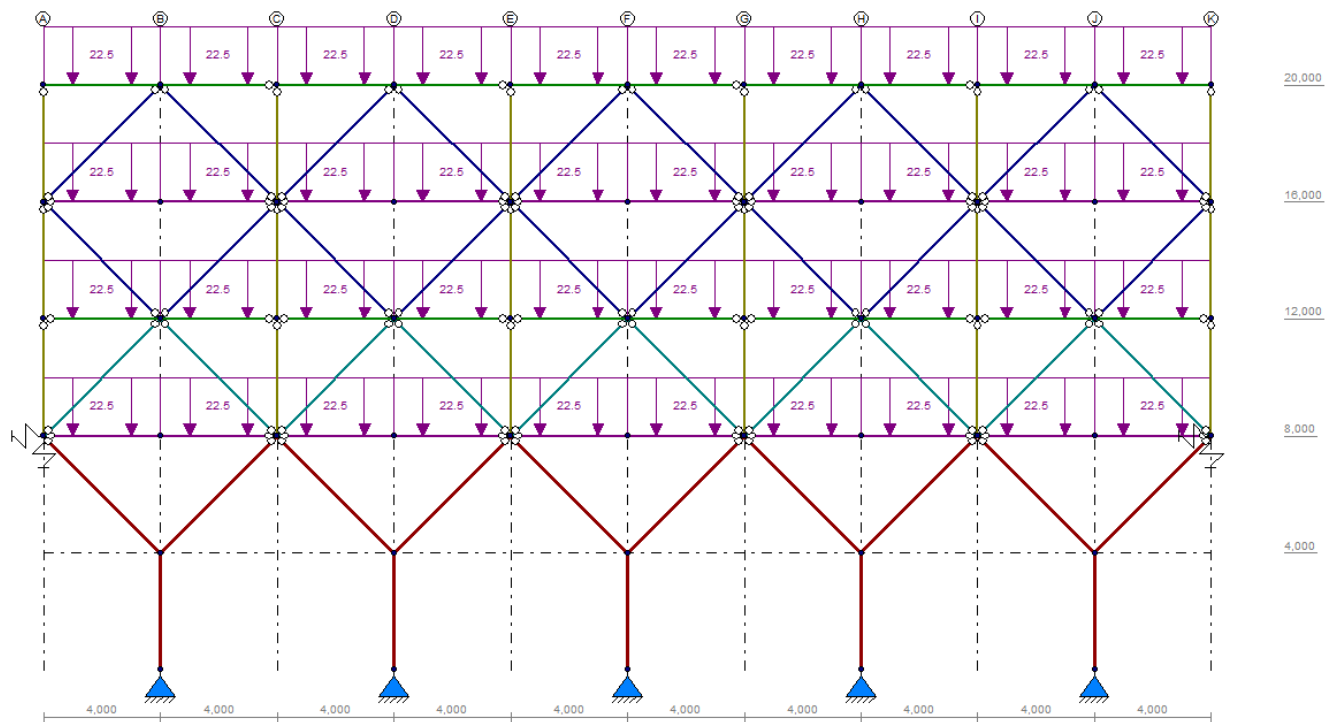
Mechanica schema:



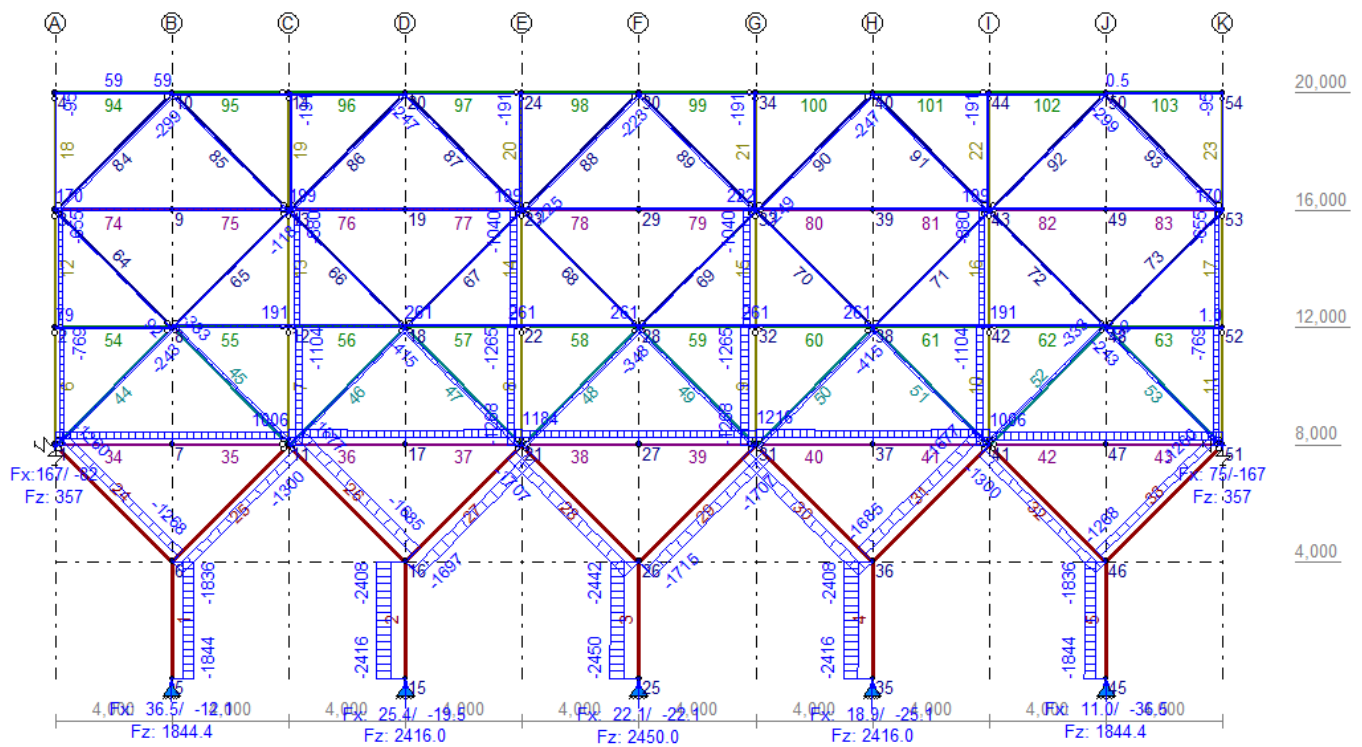
Permanente belasting:



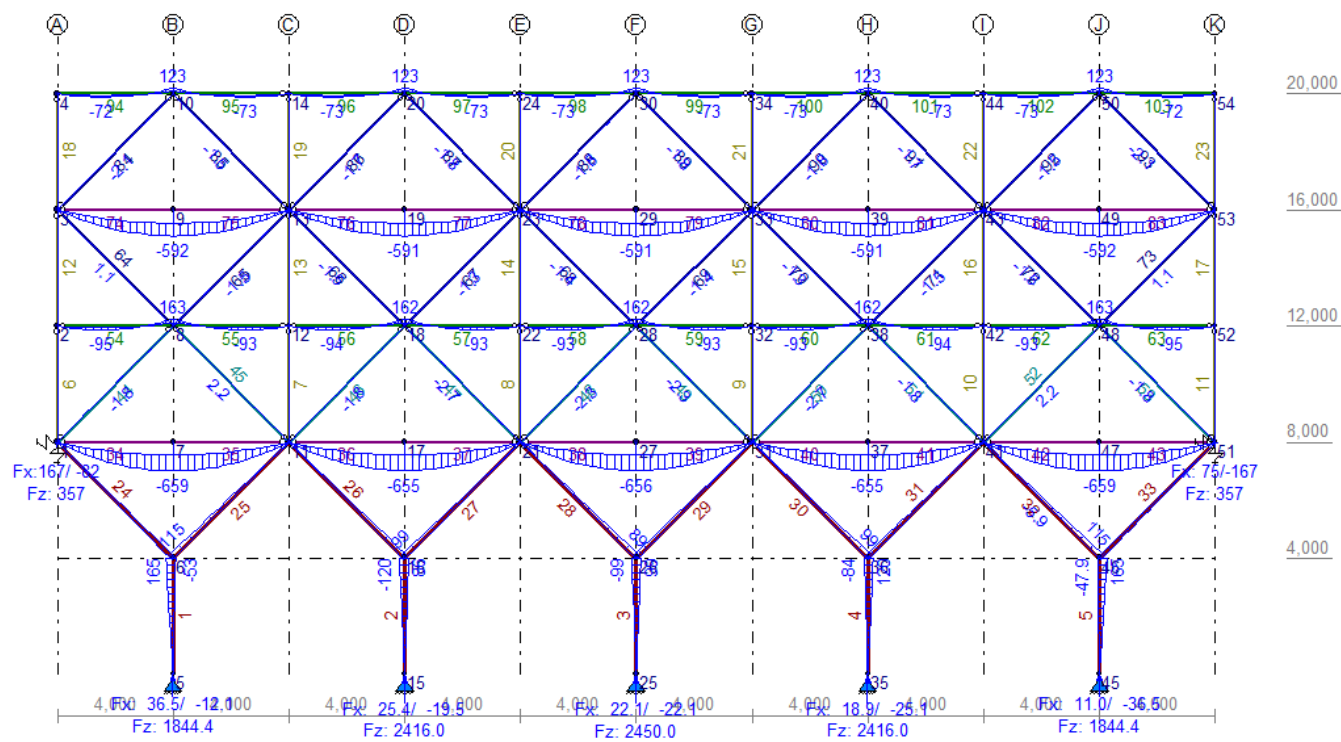
Veranderlijke belasting:



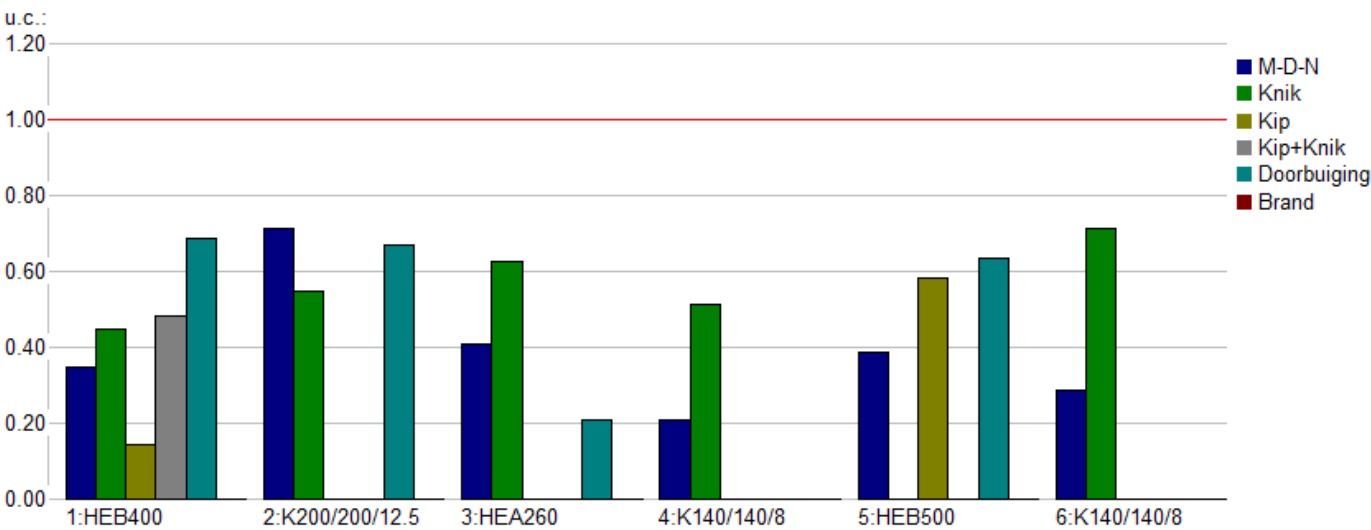
NORMAALKRACHTEN 2e orde Fundamentele combinatie



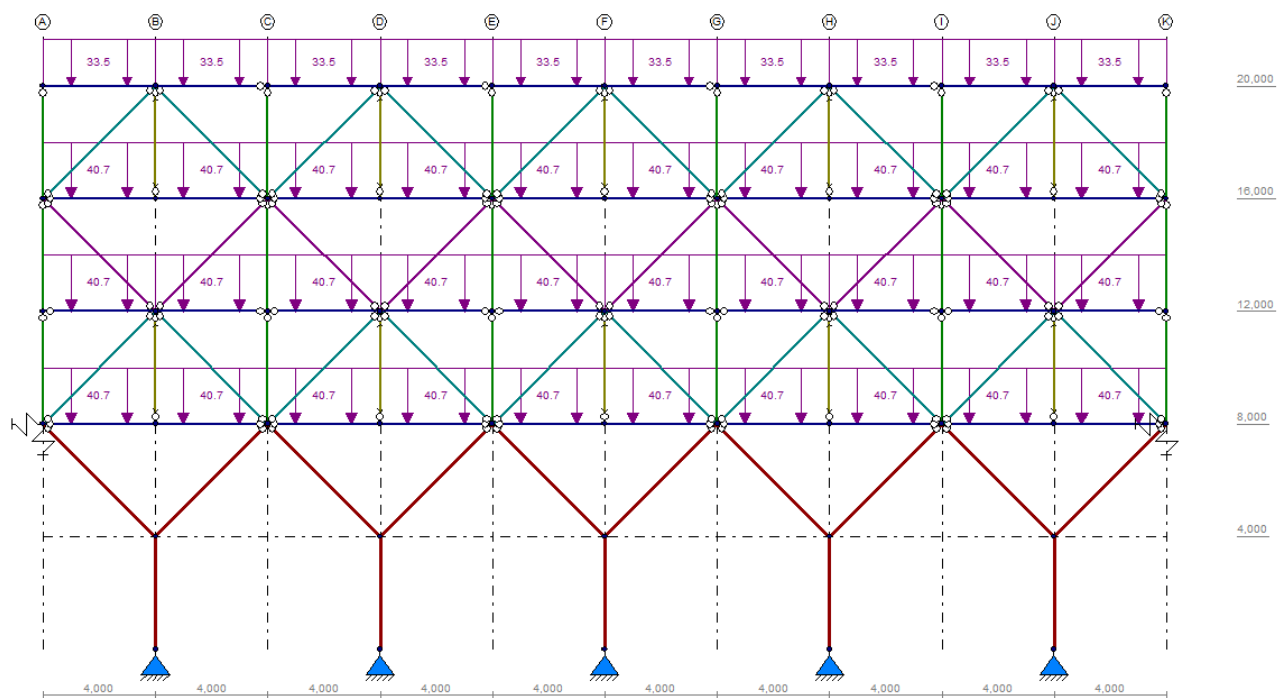
MOMENTEN 2e orde Fundamentele combinatie



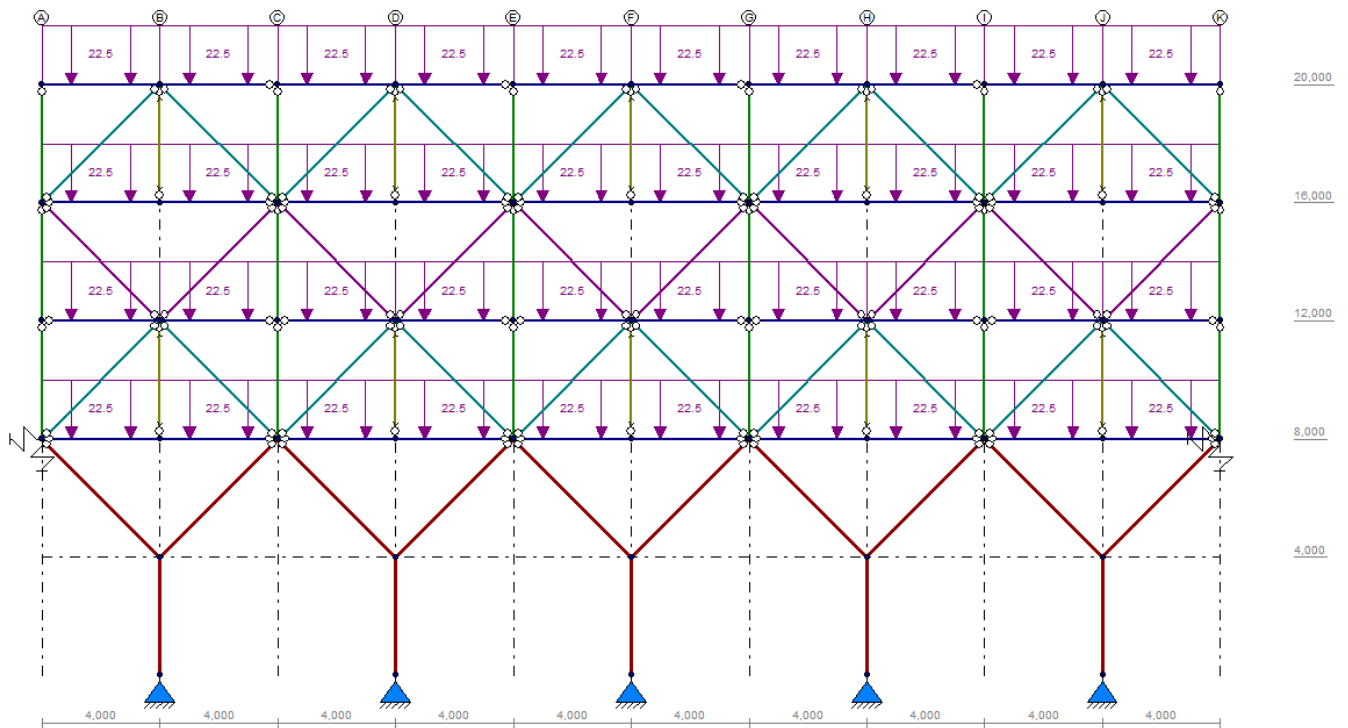
Unity check:



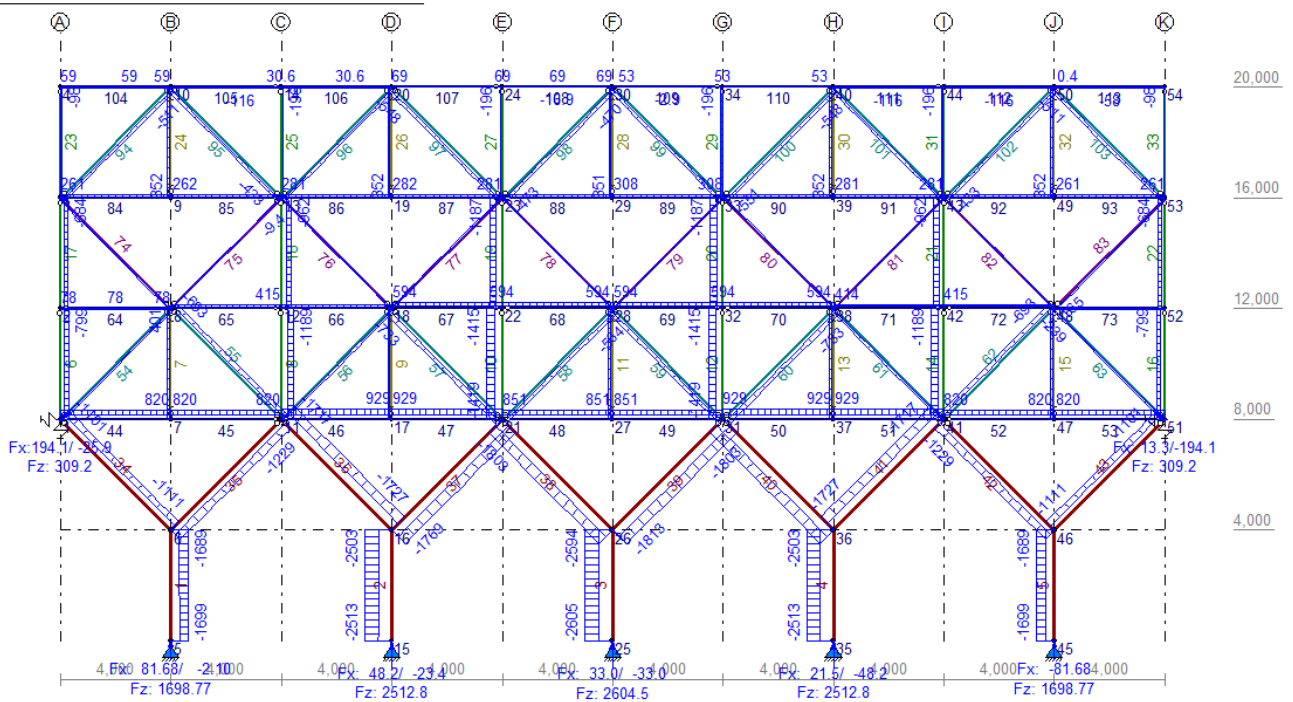
Mechanica schema:



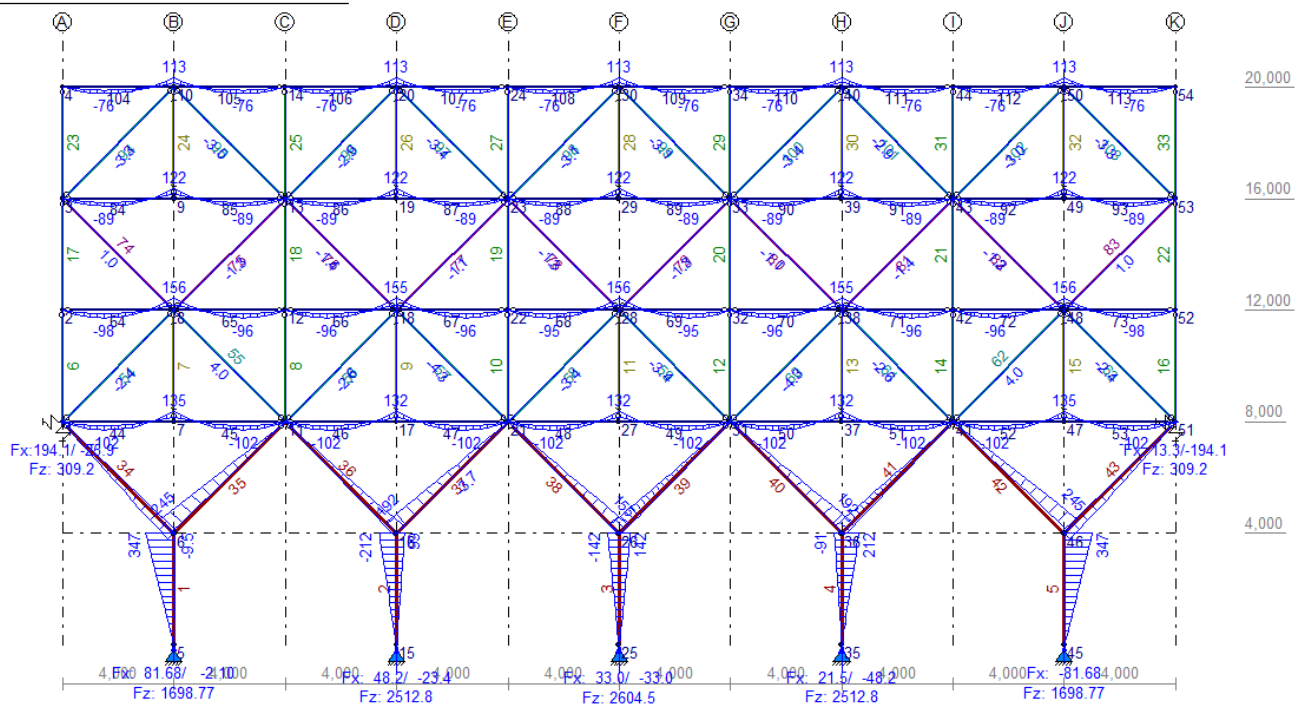
Veranderlijke belasting:



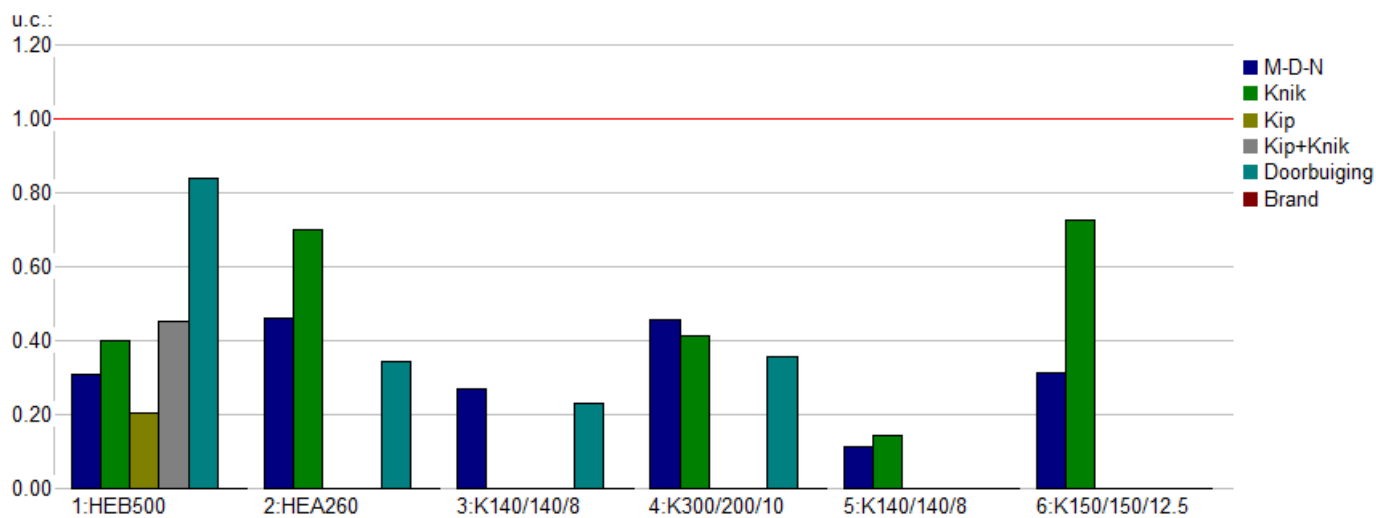
NORMAALKRACHTEN 2e orde Fundamentele combinatie



MOMENTEN 2e orde Fundamentele combinatie

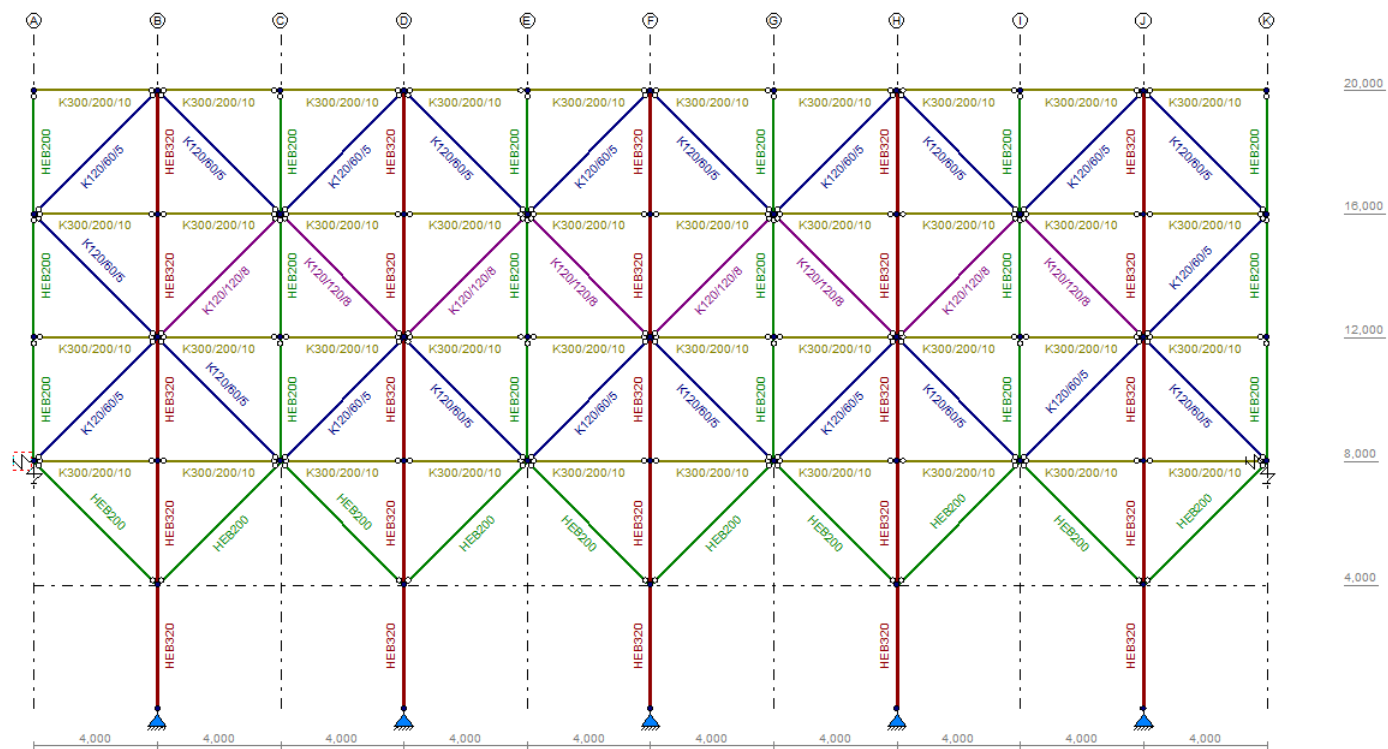


Unity check:

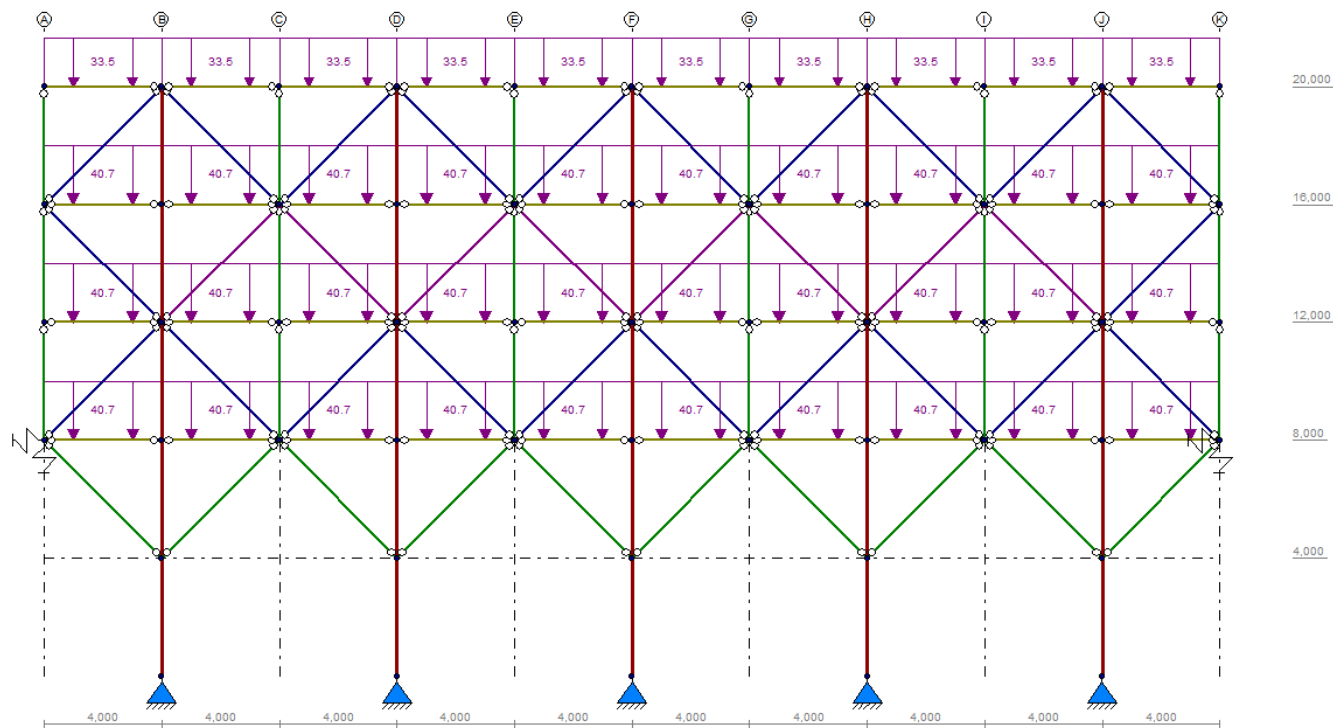


Variant 3

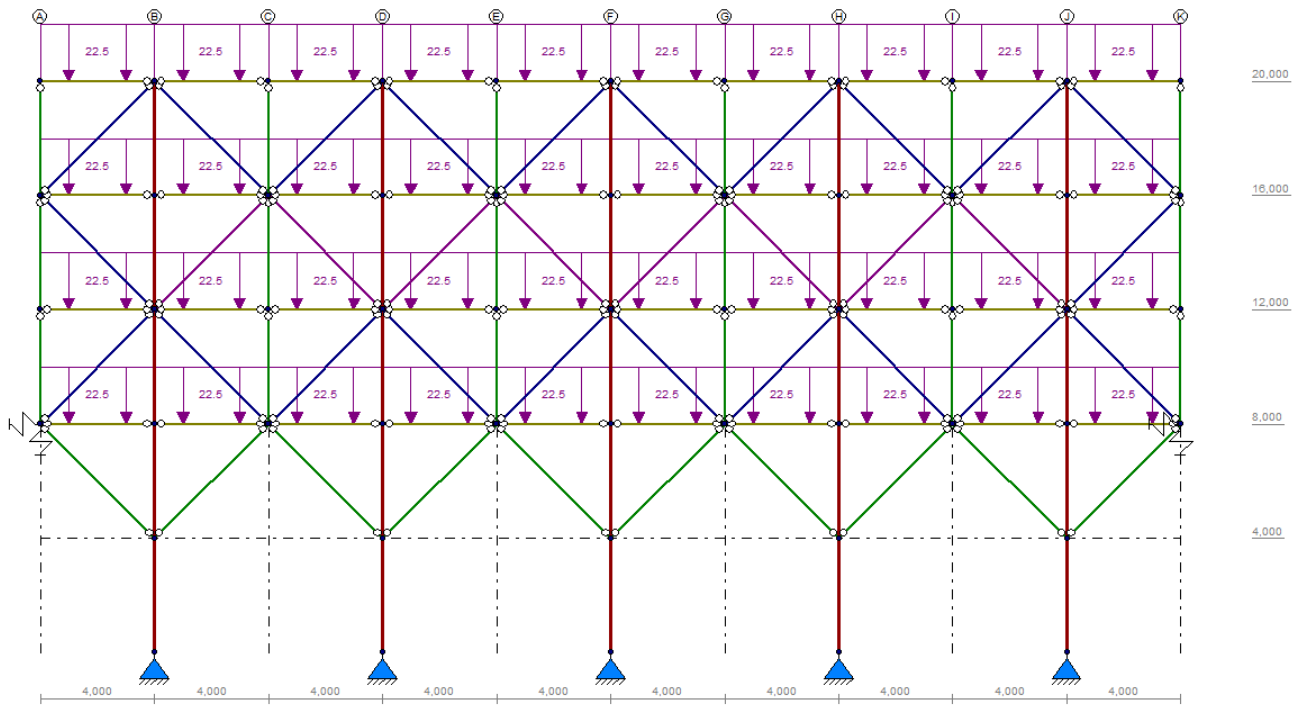
Mechanica schema:



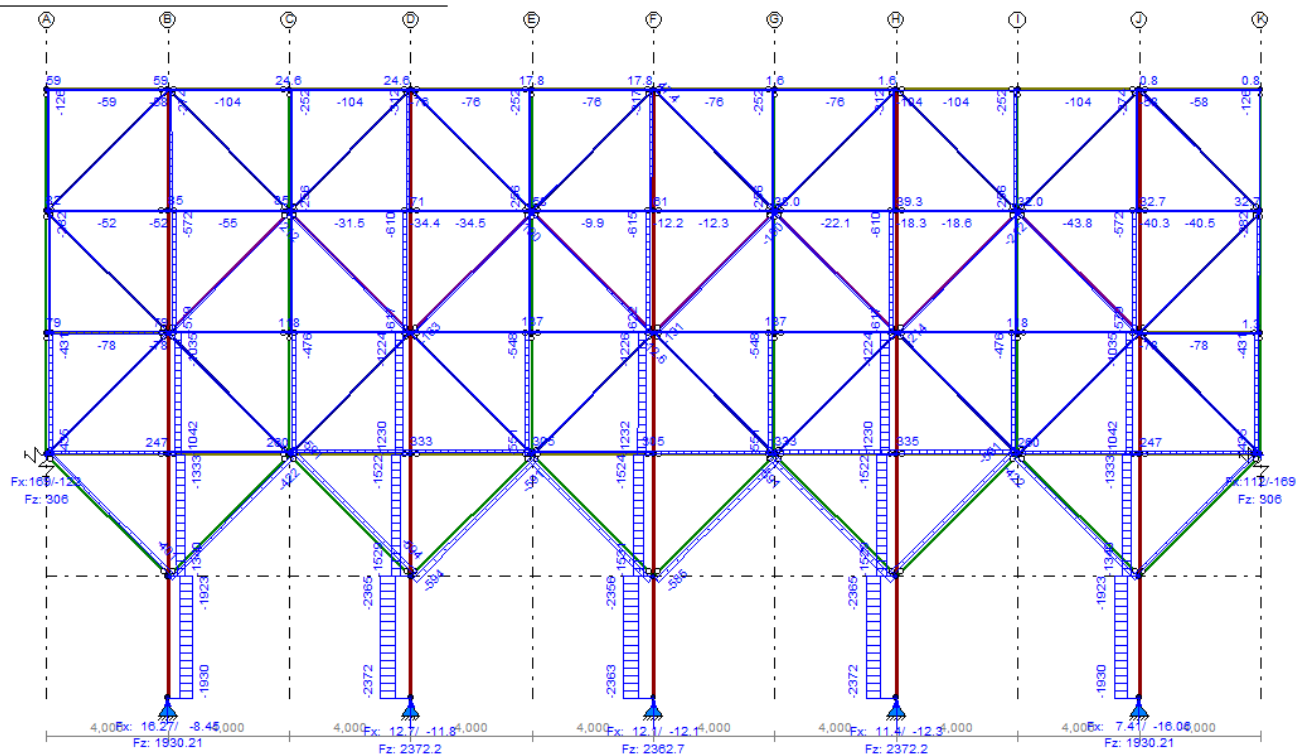
Permanente belasting:



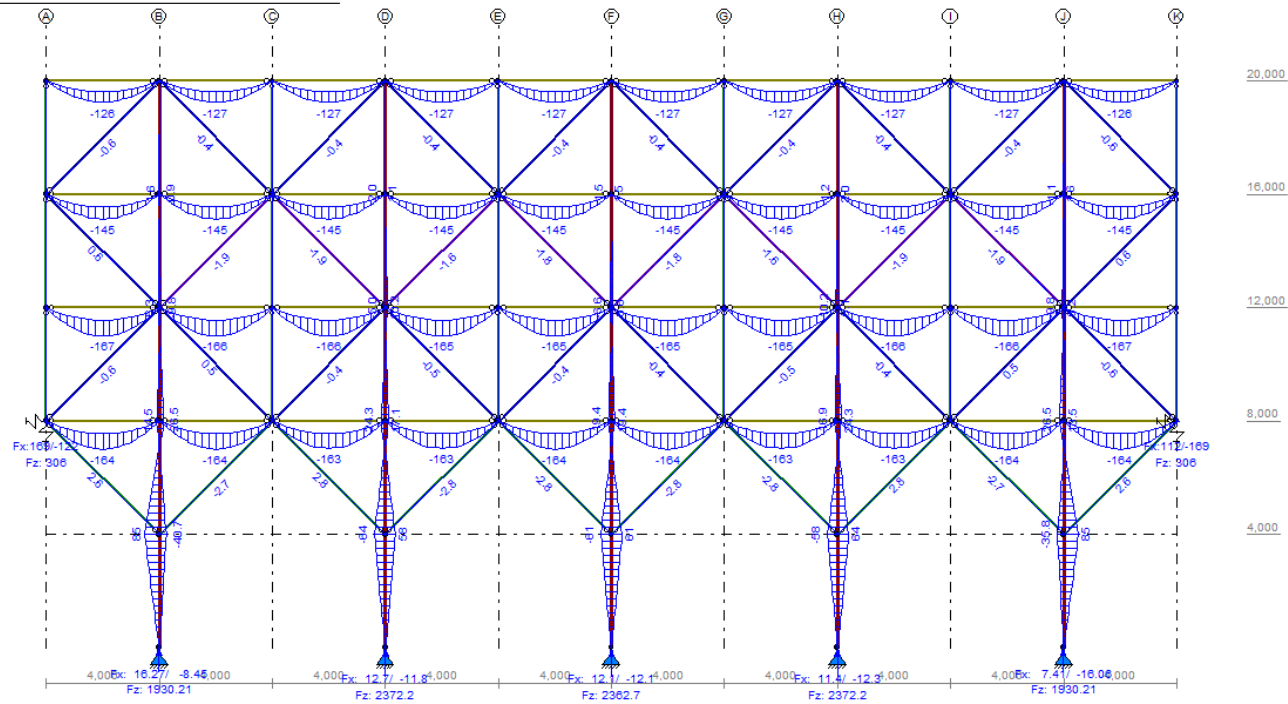
Veranderlijke belasting:



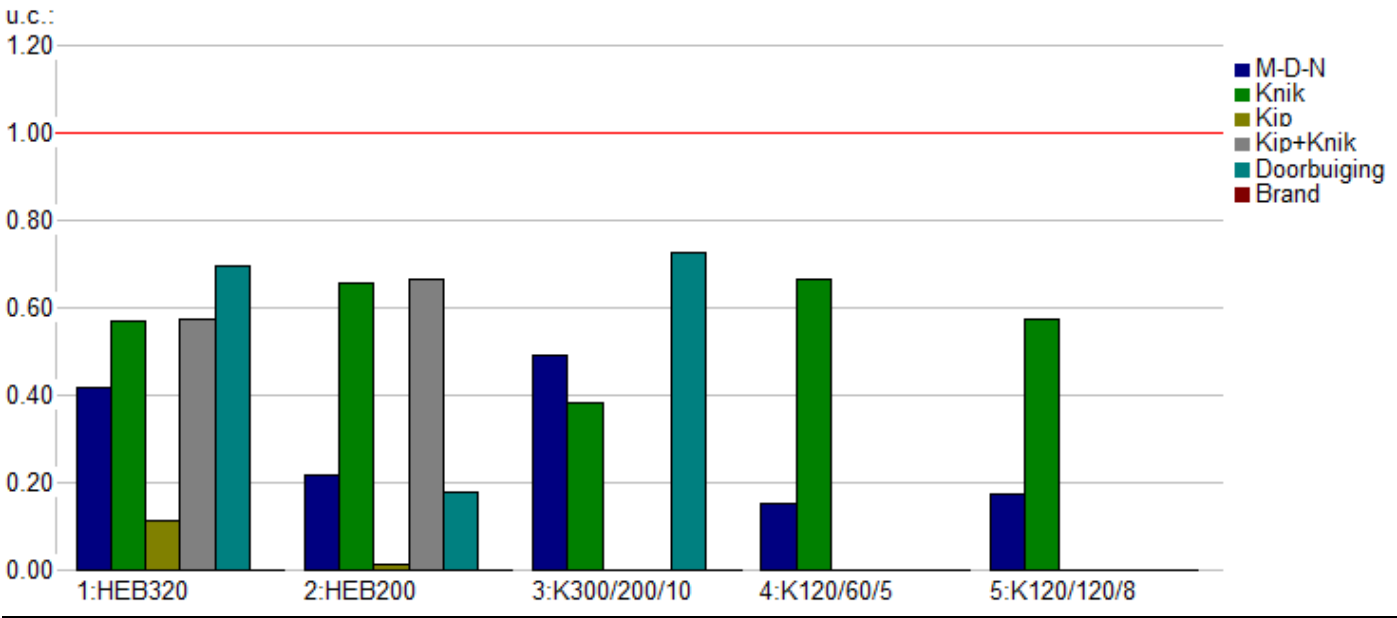
NORMAALKRACHTEN 2e orde Fundamentele combinatie



MOMENTEN 2e orde Fundamentele combinatie

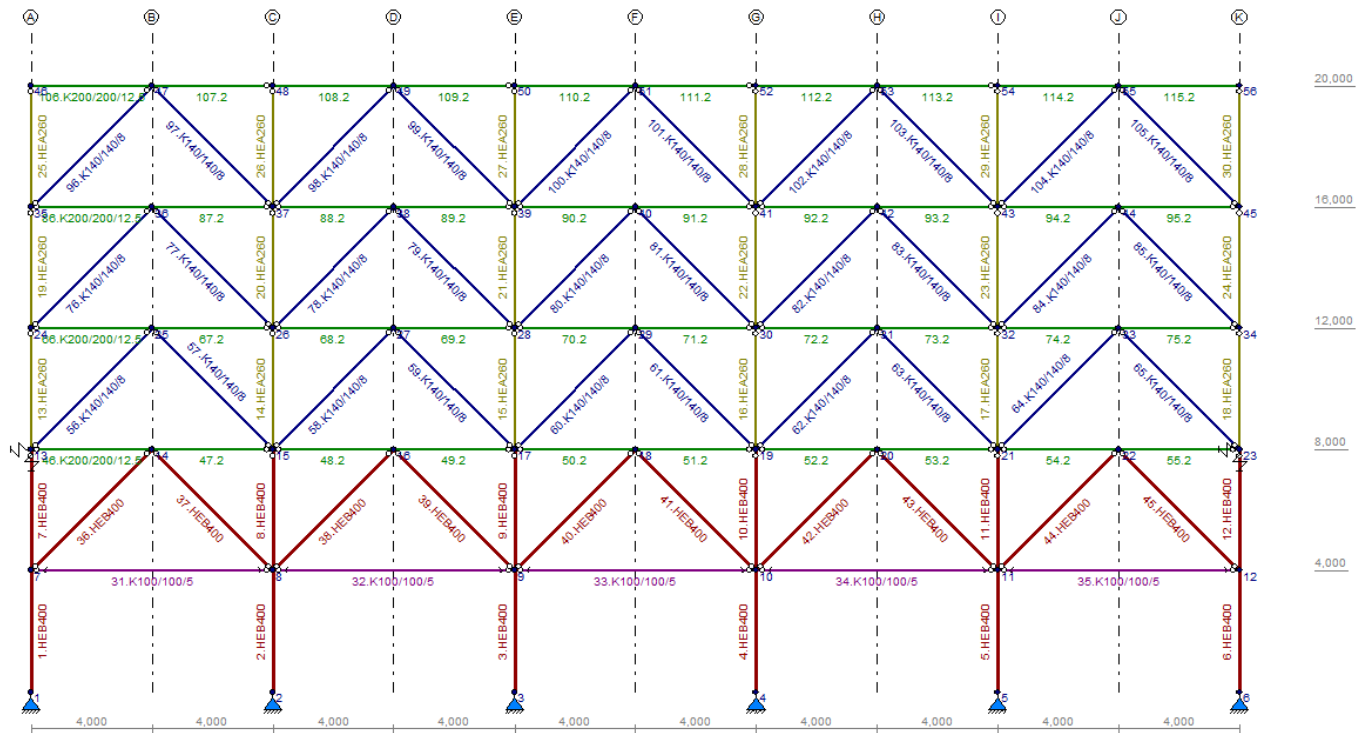


Unity check:

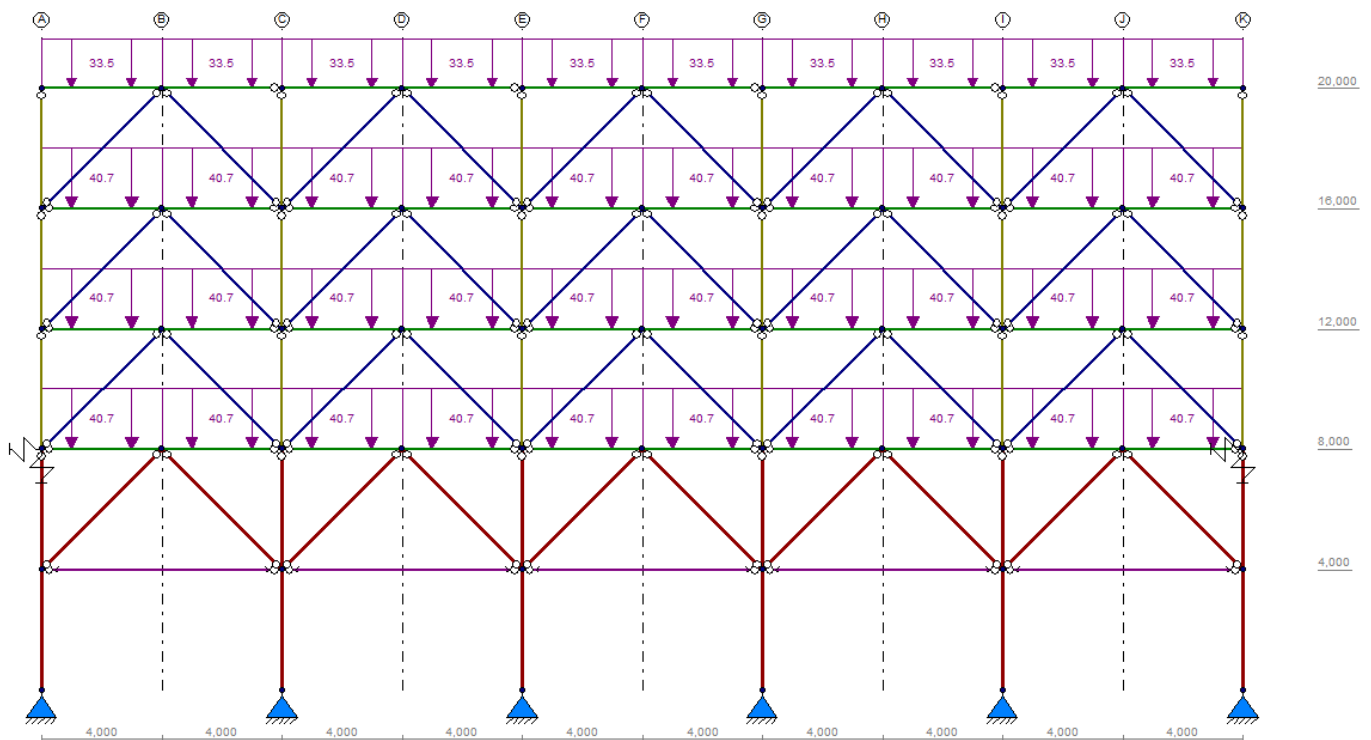


Variant 4:

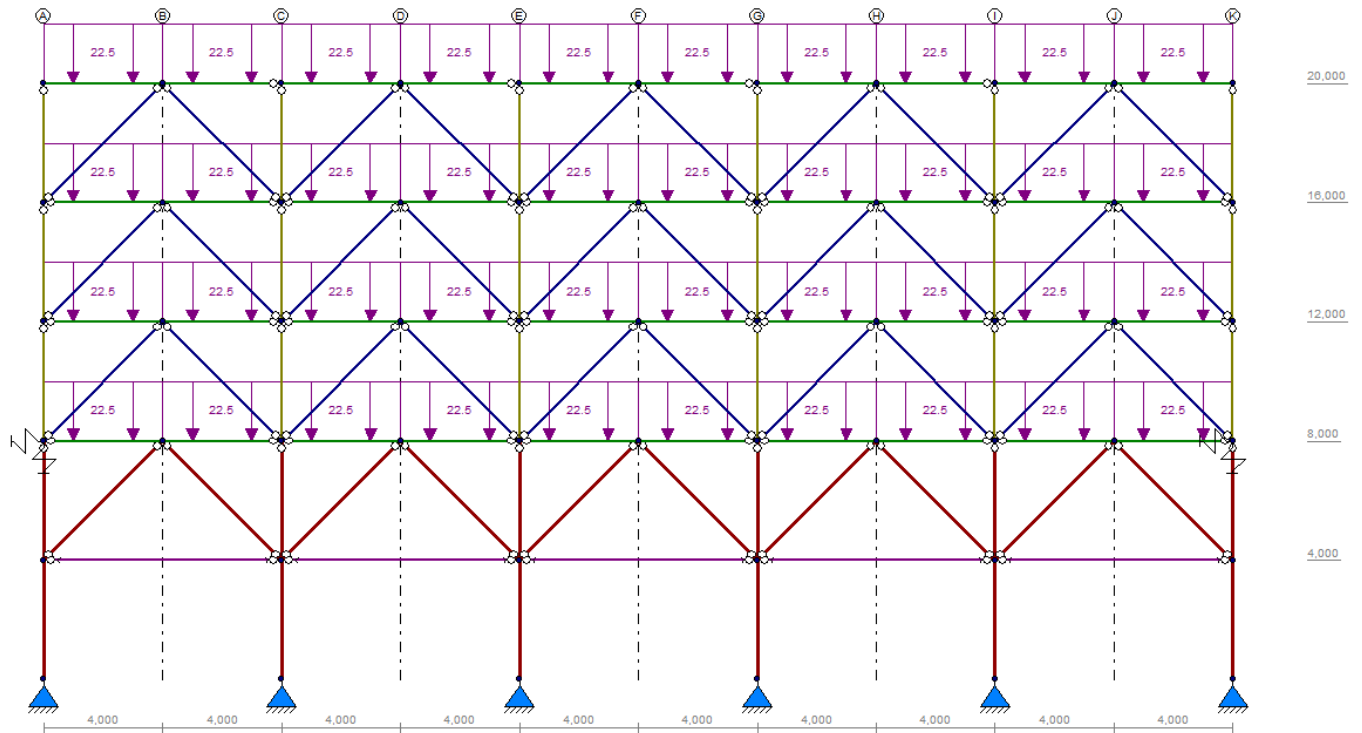
Mechanica schema:



Permanente belasting:

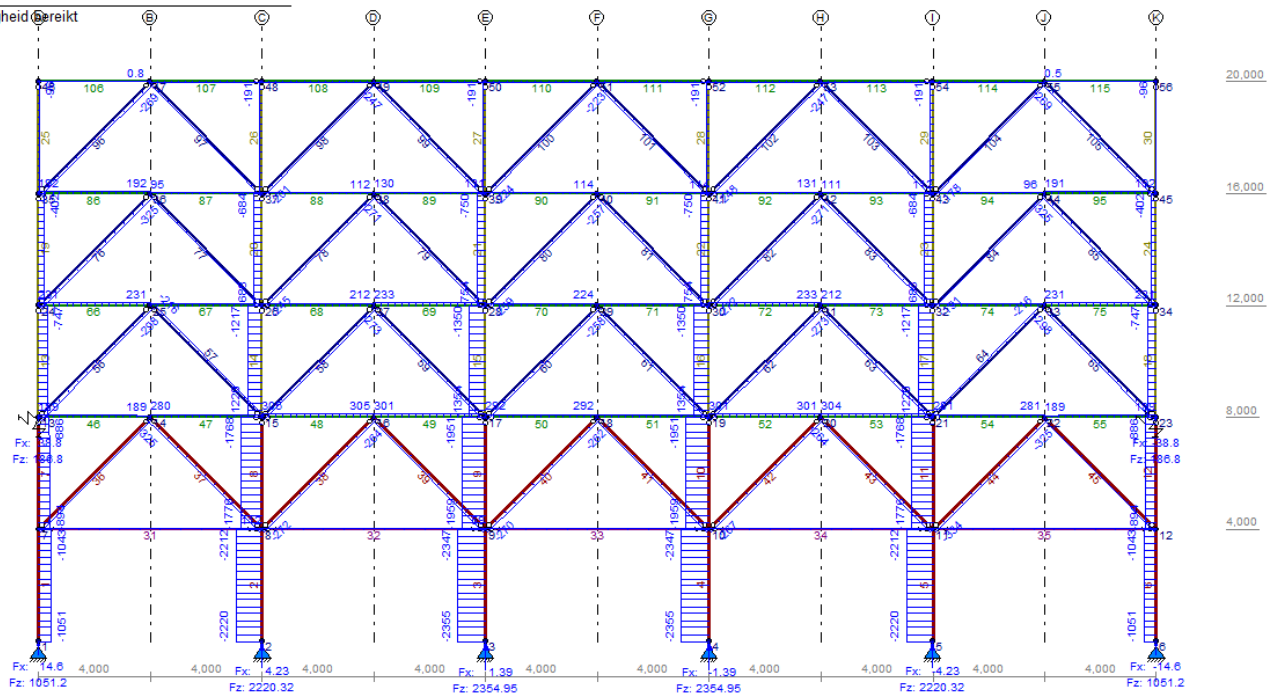


Veranderlijke belasting:



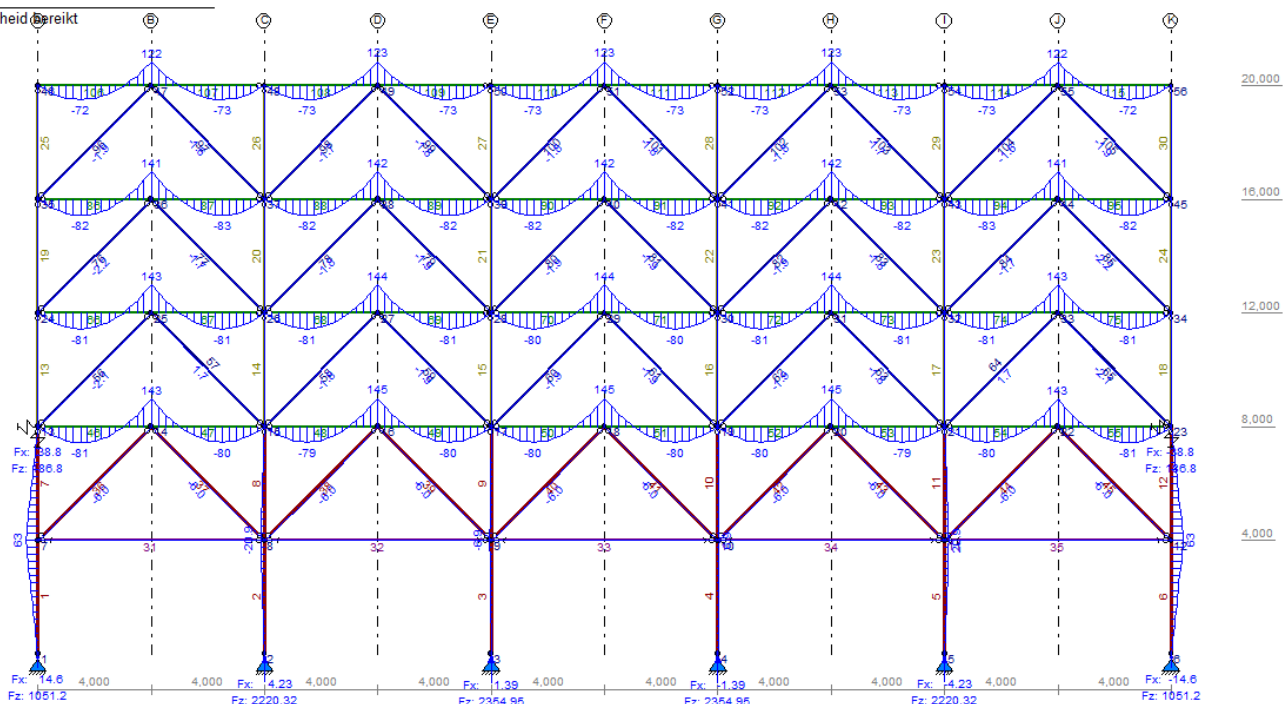
NORMAALKRACHTEN 2e orde B.C.:1 6.10 a

Nauwkeurigheid bereikt

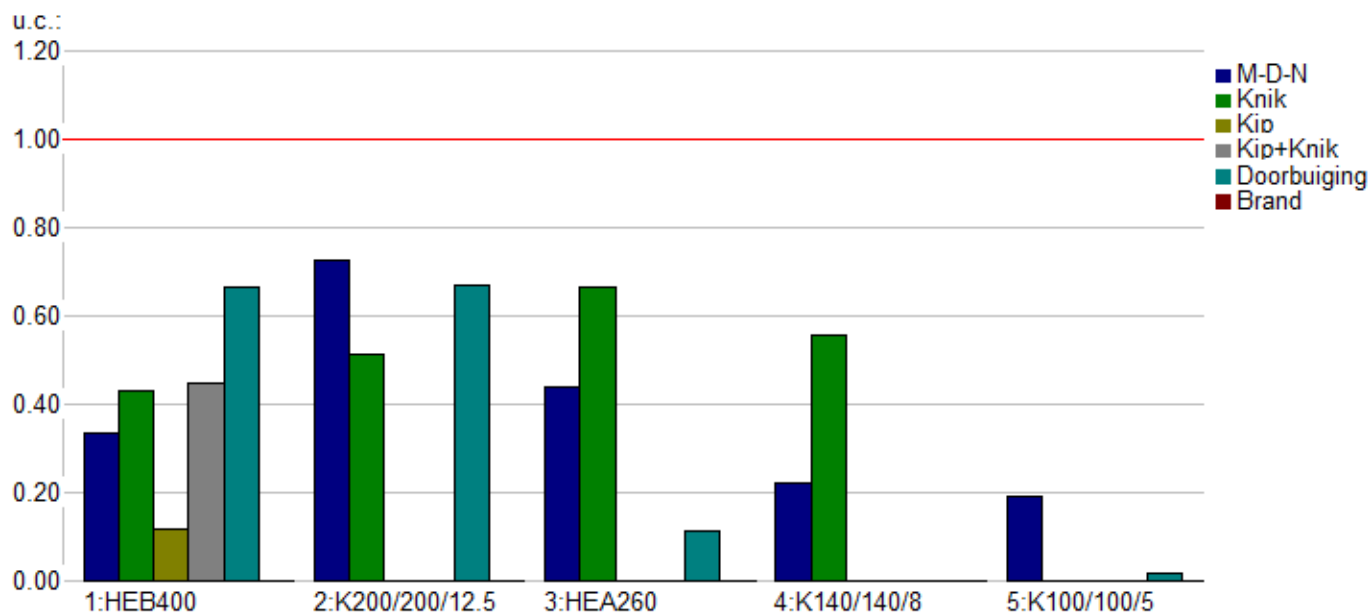


MOMENTEN 2e orde B.C.:1 6.10 a

Nauwkeurigheid bereikt

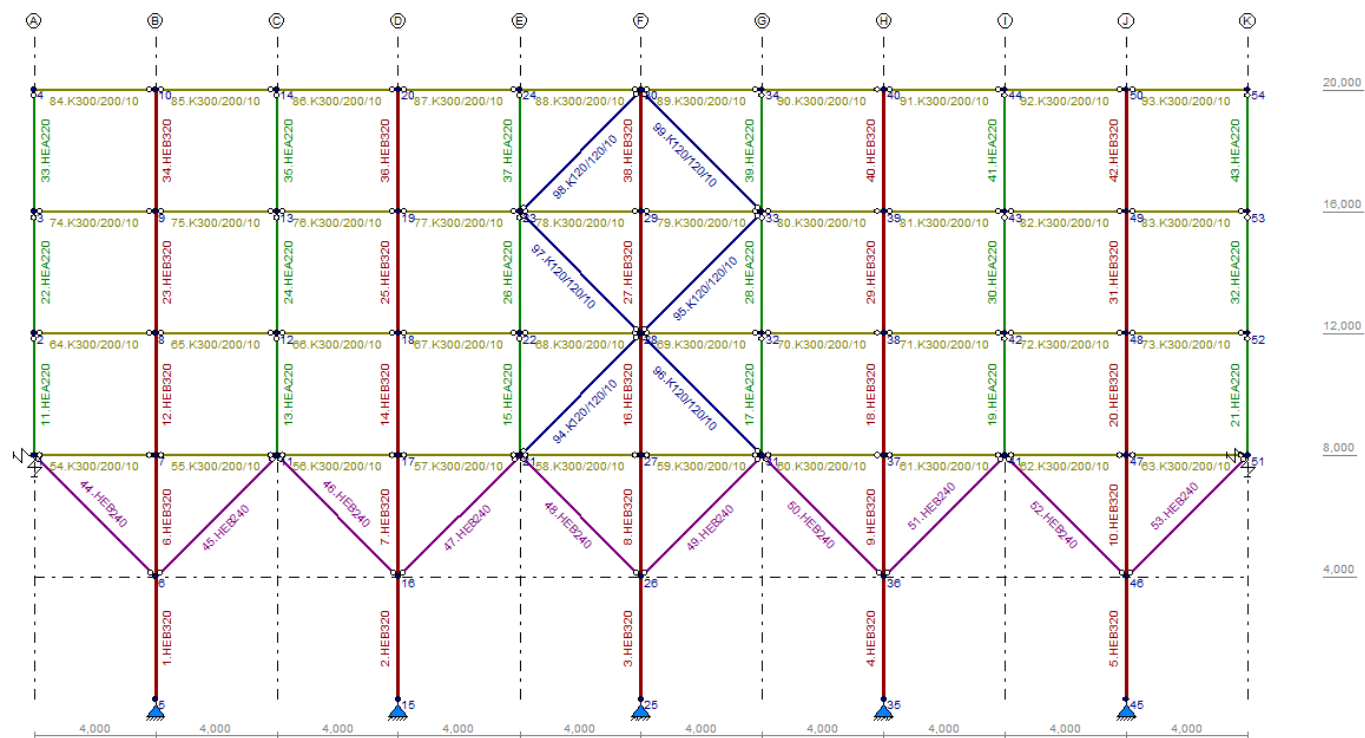


Unity check:

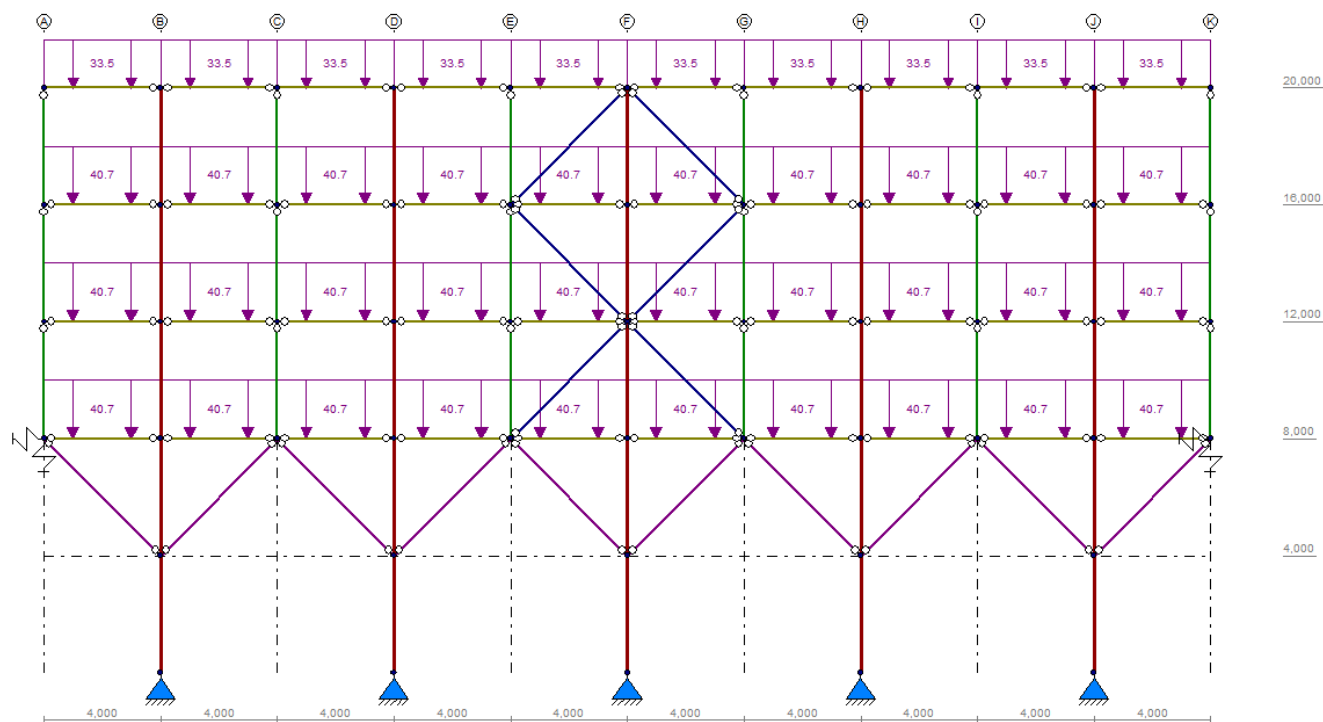


Variant 5:

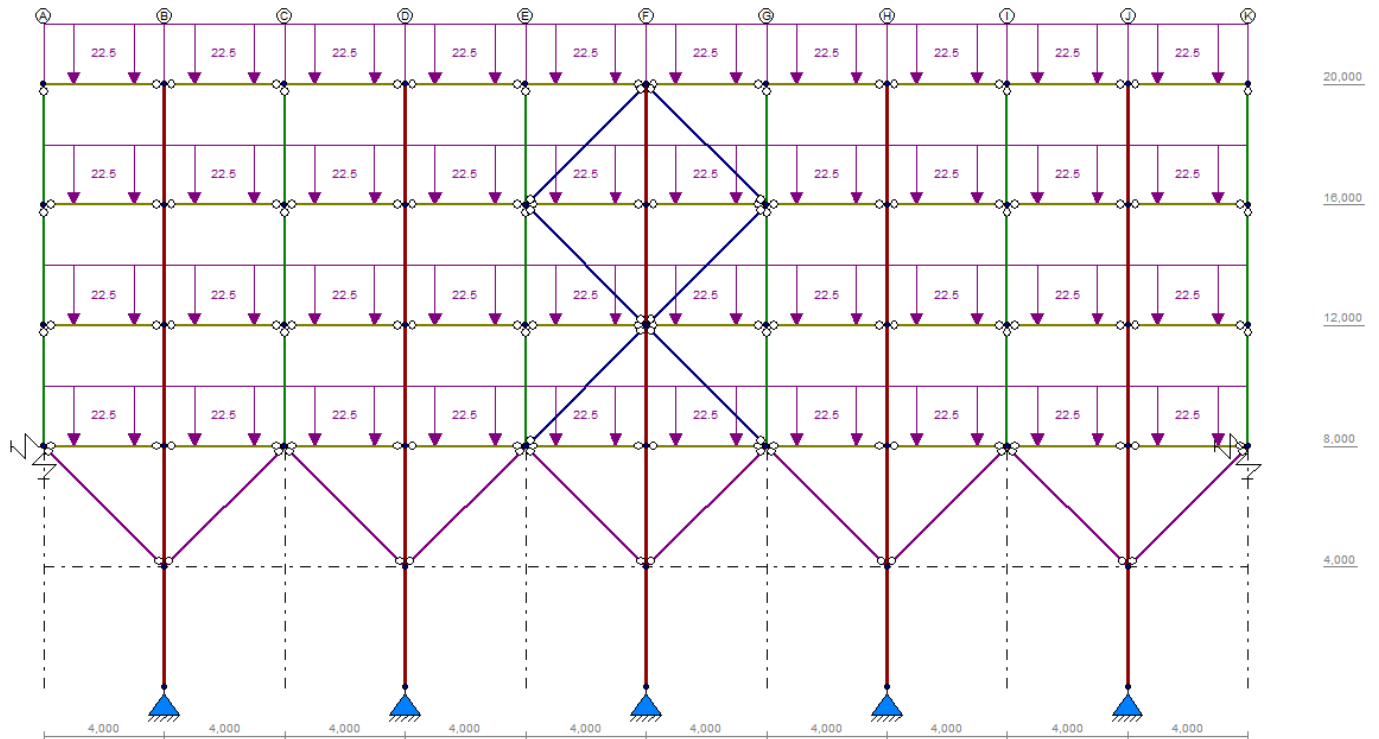
Mechanica schema:



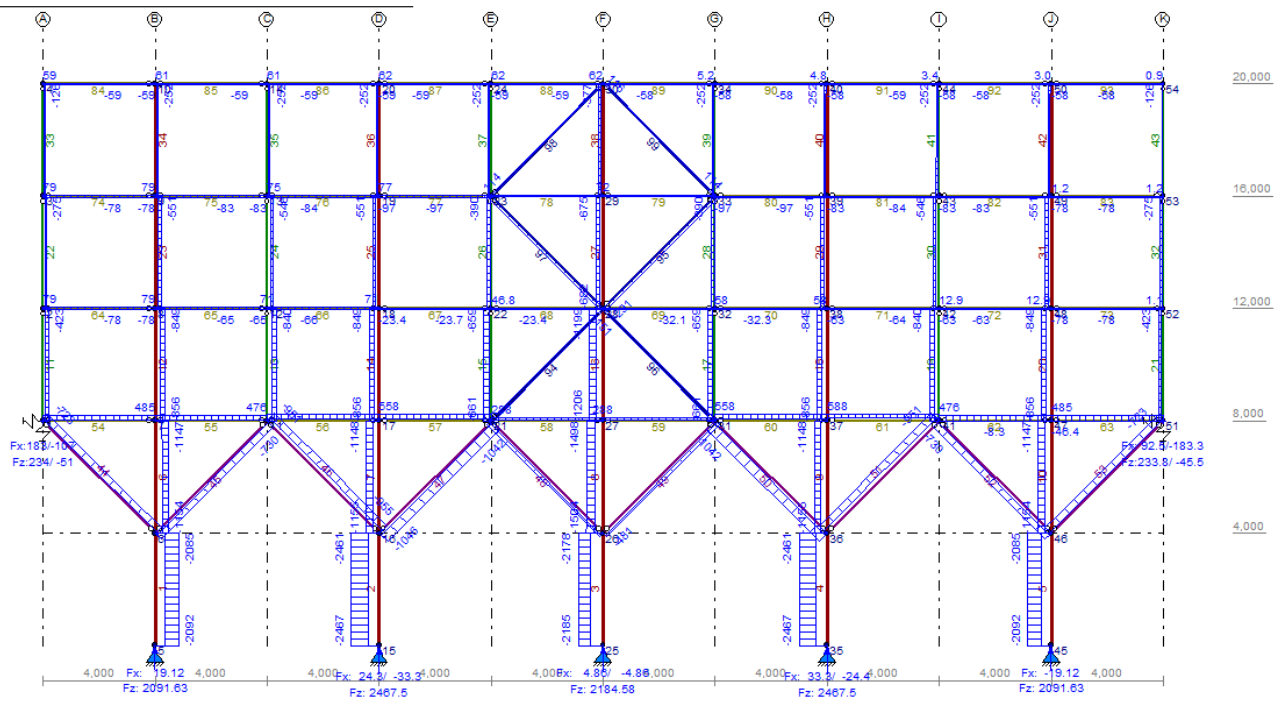
Permanente belasting:



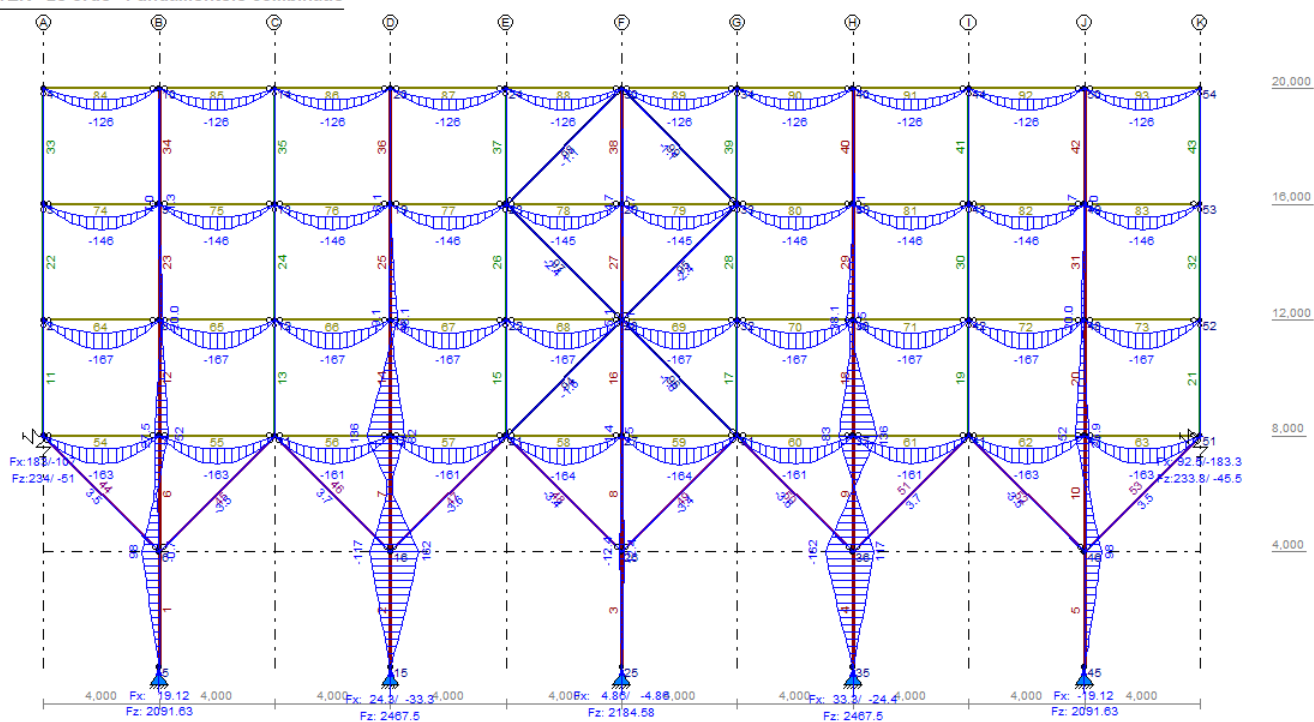
Veranderlijke belasting:



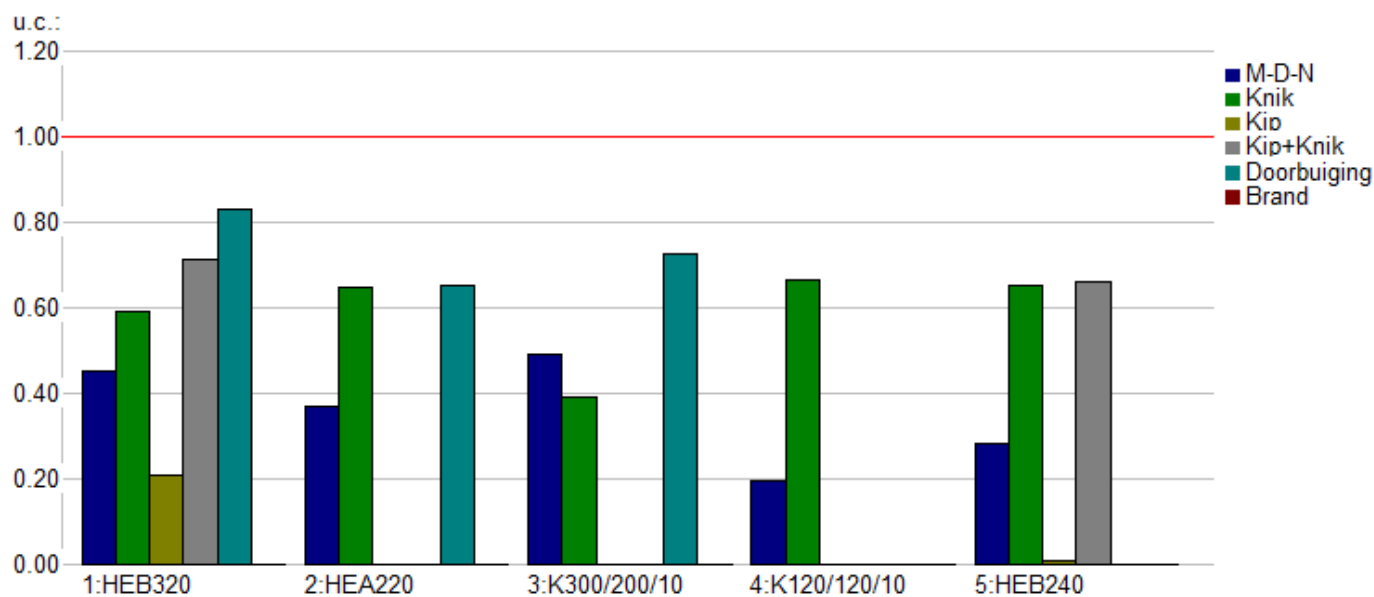
NORMAALKRACHTEN 2e orde Fundamentele combinatie



MOMENTEN 2e orde Fundamentele combinatie



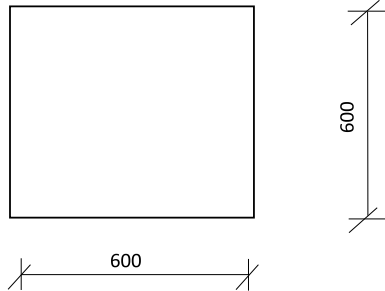
Unity check:



Bijlage II: toetsing betonnen Y- kolom

kolom afmetingen

h	600 mm
b	600 mm
L	4000 mm



$$NC = f_{cd} \cdot b \cdot \alpha \cdot x_u$$

$$NS = f_{yd} \cdot a_s$$

$$NC = NS$$

$$Z = d - \beta \cdot x_u$$

$$M_{Rd} = NC \cdot Z \text{ of } NS \cdot Z$$

$$A_{s,min} = \frac{0,10 N_{ed}}{f_{yd}} \text{ of } 0,002 A_c,$$

Uitgangspunten:

Beton:

Betonkwaliteit: C45/55
Milieuklasse: XC4

f_{ck}	45 N/mm ²
f_{cd}	30 N/mm ²
f_{ctd}	1,77 N/mm ²
f_{ctm}	3,8 N/mm ²

Wapeningstaal:

B500B
 f_{yd} 435 N/mm²
gekozen diameter $\emptyset$ 25 mm

interne krachten:

M_y	300 kNm
N_{ed}	1960 kN

dekking c	35 mm
d	552,5 mm

x_u (drukzone) berekening

$$M_{rd} = f_{cd} \cdot b \cdot \alpha \cdot x_u \cdot (d - \beta \cdot x_u)$$

α	0,75
β	0,39

$$x_u = \frac{d - \sqrt{d^2 - \frac{4 \times \beta \times M_{rd}}{\alpha \times b \times f_{cd}}}}{2 \times \beta} = 41,4 \text{ mm}$$

$$N_c = NS = f_{cd} \cdot b \cdot \alpha \cdot x_u = 559346 \text{ N}$$

$$N_s = f_{yd} \cdot a_s$$

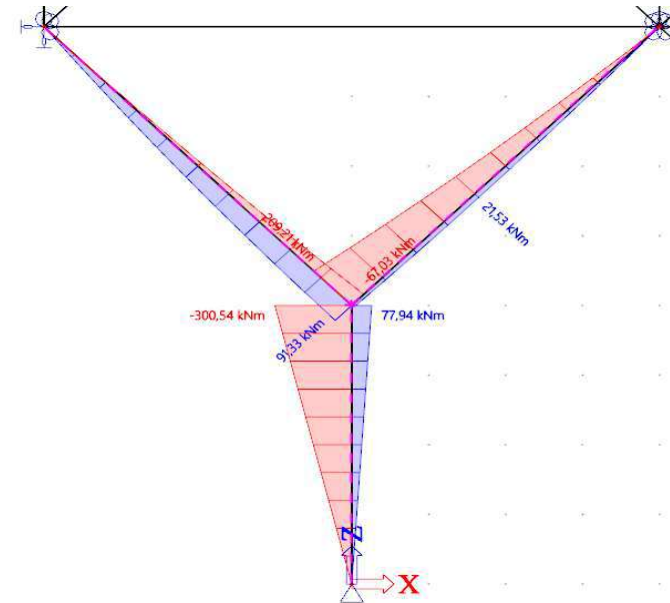
$$N_{ed} = 1960000 \text{ N}$$

$$N_{ed} > N_s$$

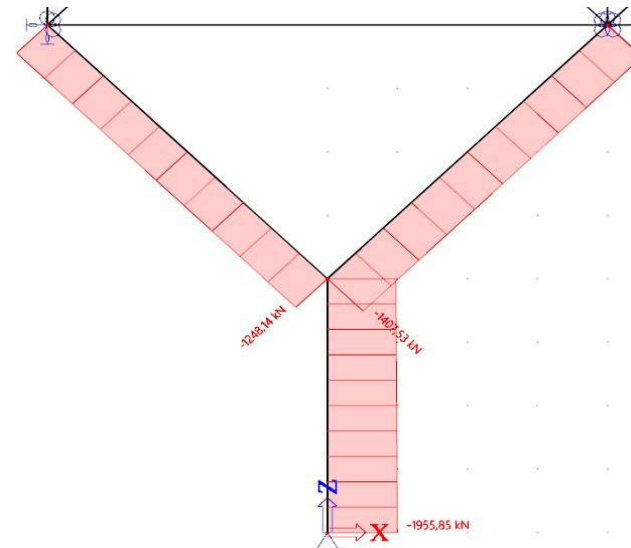
$$a_s = \frac{NC}{f_{yd}} = 4506 \text{ mm}^2$$

wapening: 10 – $\emptyset 25$
as provided 4908 mm²
wapening per zijde: 5 – $\emptyset 25$

UGT: maximaal moment



UGT: Maximale normaalkracht



2de toets: kolom berekening moment met normaalkracht

kolom berekening

$$I = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 \rightarrow I = 1,1E+10 \text{ mm}^4$$

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} \rightarrow i = 173,21 \text{ mm}$$

$$\lambda = \frac{L_0}{i} \rightarrow \lambda = 23,1$$

$$n = \frac{N_{ed}}{A_c \cdot f_{cd}} \rightarrow n = 0,181$$

$$\lambda_{lim} = \frac{20 \cdot A \cdot B \cdot C}{\sqrt{n}} \rightarrow A = \frac{1}{1 + 0,2\varphi_{ef}} \rightarrow \varphi_{ef} = \varphi(\infty, t_0) \cdot \frac{M_{0Eqp}}{M_{0Ed}}$$

(Nen-en 1992-1-1 fig 3.1.4) $\varphi(\infty, t_0) = 1,5$

$$M_{0Eqe} = 215 \text{ kNm} \rightarrow \text{BGT}$$

$$M_{0Ed} = 300 \text{ kNm} \rightarrow \text{UGT}$$

$$\varphi_{ef} = \varphi(\infty, t_0) \cdot \frac{M_{0Eqp}}{M_{0Ed}} \rightarrow \varphi_{ef} = 1,08$$

Invloed van de kruip

$$A = \frac{1}{1 + 0,2\varphi_{ef}} \rightarrow A = 0,823$$

Invloed van de wapening

$$B = \sqrt{1 + 2 \cdot w} \rightarrow w = \rho \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} \quad \rho = 1,0\% \leftarrow A_{name}$$

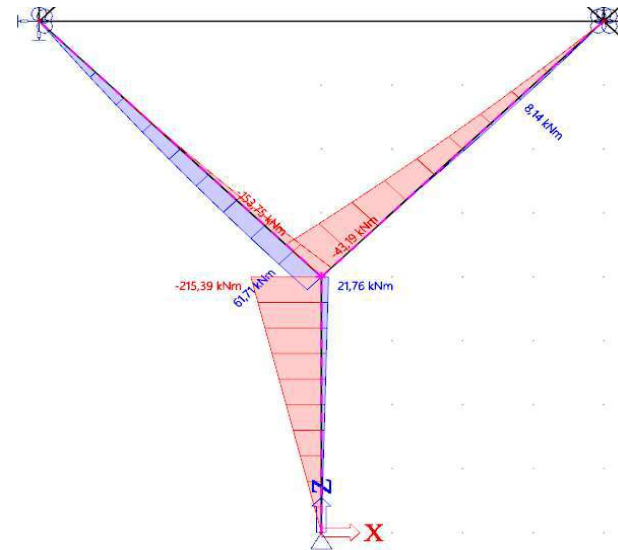
$$w = 3\% \cdot \frac{435}{30} \rightarrow w = 0,15$$

$$B = \sqrt{1 + 2 \cdot w} \rightarrow B = 1,1$$

Invloed van het moment

$$C = 0,7$$

BGT: maximaal moment



Controle $\lambda < \lambda_{lim}$

$$\lambda_{lim} = \frac{20 \cdot A \cdot B \cdot C}{\sqrt{n}}$$

$$\lambda_{lim} = 30,7$$

$$\lambda = 23,1$$

$\lambda < \lambda_{lim}$? **Voldoet**

$$e_0 = \frac{M_{ed}}{N_{ed}} \rightarrow e_0 = 153,1 \text{ mm}$$

$$n = \frac{N_{ed}}{A_c \cdot f_{cd}} \rightarrow n = 0,181$$

$$\frac{N_{ed}}{A_c \cdot f_{cd}} \cdot \frac{e}{h} = \frac{M_{ed}}{f_{cd} \cdot b \cdot h^2} \rightarrow \frac{N_{ed}}{A_c \cdot f_{cd}} \cdot \frac{e}{h} = 0,0463$$

Uit tabel aflezen:

r	0,25	=> aanname
β	1,61 C45/55	$\rho = r \cdot \beta$
ρ	0,40%	

A_s	$= \rho \cdot A_c$	Wapening:	$A_{sreq} = 1449,0 \text{ mm}^2$
		wapening	3 – Ø 25 mm
		As provided	1472 mm ²
Maatgevend vgl met moment berekening?			Niet maatgevend

A_{smin}	$= \frac{0,10 \cdot N_{ed}}{f_{yd}}$	Langswapening	$A_{smin} = 450,6 \text{ mm}^2$
		Diameter langsstaf =	16 mm
		wapening	3 – Ø 16 mm
	As provided	603 mm ²	

$A_{smax} = 0,04 \cdot A_c$	$\rightarrow$	$A_{smax} = 14400,0 \text{ mm}^2$
-----------------------------	---------------	-----------------------------------

$A_s; min \leq A_s; prov \leq A_s; max$	$\rightarrow$	Voldoet
---	---------------	----------------

Tabel 17.4 Buiging en normaalkracht

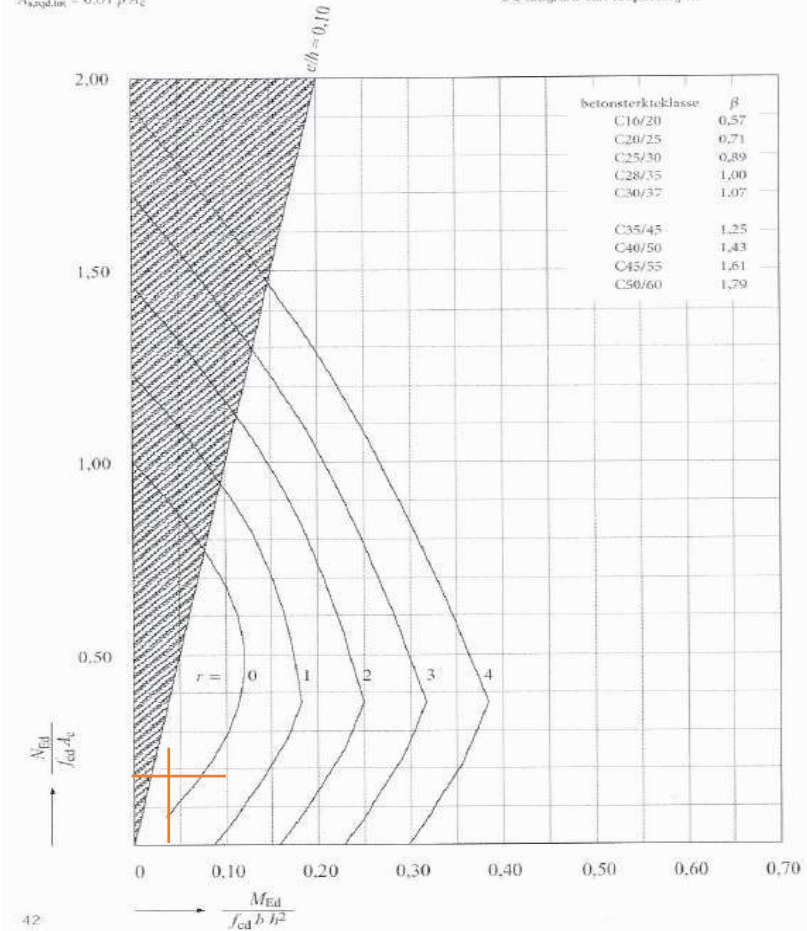
C16/20 – C50/60

B500

$d_s/h = 0,20$

symmetrisch gewapende doorsnede
r is wapeningsgetal in ‰
 ρ is wapeningsverhouding in ‰ voor totale doorsnede – $r \cdot \beta$
 $A_{s,gepland} = 0,01 \cdot \rho \cdot A_c$

NB Gebied boven de lijn $e/h = 0,10$ is geïgnoreerd omdat bij nagenoeg centrische druk ($e/h \leq 0,10$) een aangepast σ - ϵ -diagram van toepassing is.



Beugels

kleinste h.o.h beugel afstand bepalen volgens NEN-EN 1992-1-1
Bij geen overlappingslassen

Scl,tmax=

of

of

of

20 * Ø langswapening
kleinste afmeting kolom
400 mm

→
→
→

500,0
600,0
400,0 praktisch

Scl,tmax=

400,0 mm
250 mm

Beugels wapening Øbgl 10 mm Ø10-250 mm

bij overlappingslassen:
factor: 0,6

Scl,tmax=

of

of

of

0,6* 20 * Ø langswapening
0,6* kleinste afmeting kolom
0,6* 400 mm

→
→
→

300,0
360,0
400,0 praktisch

Scl,tmax=

300,0 mm
250 mm

Beugels wapening Øbgl 10 mm Ø10-250 mm

Scheurwijdte

Staalspanning berekenen

$$\sigma_s = \frac{M_{freq}}{M_d} \cdot \frac{A_{sreq}}{A_{sprov}} \cdot f_y$$

→

286,2 N/mm2

Tabel 7.2N — Maximale staafdiameters ϕ^* , voor scheurbeheersing¹

Staalspanning ² (MPa)	Maximale staafdiameter (mm)		
	w _k = 0,4 mm	w _k = 0,3 mm	w _k = 0,2 mm
160	40	32	25
200	32	25	16
240	20	16	12
280	16	12	8
320	12	10	6
360	10	8	5
400	8	6	4
450	6	5	—

OPMERKING 1 De waarden in de tabel zijn gebaseerd op de volgende aannamen:
c = 25 mm; f_{ct,eff} = 2,9 MPa; h_{cr} = 0,5 h; (h-d) = 0,1h; k₁ = 0,8; k₂ = 0,5; k₃ = 0,4;
k = 1,0; k_i = 0,4 en k₄ = 1,0.

OPMERKING 2 Onder de van toepassing zijnde belastingscombinaties.

beton klasse XC4
wk 0,25 mm
Ø* s 11,5 mm

kc= → 0,4

hcr= 0,5 * h → 300 mm

f(ct,eff)= → 2,9 N/mm2

maximale staafdiameter voor buiging

$$\phi_s = \phi^* \cdot \frac{f_{ct,eff}}{2,9} \cdot \frac{k_c \cdot h_{cr}}{2(h-d)}$$

→

14,53 mm

staaf diameter → 25 mm

staaf diamter < maximale staafdiameter? → Voldoet niet

maximale staaf afstand

Tabel 7.3N — Maximale staafafstand voor scheurbeperking¹

Staalspanning ² (MPa)	Maximale staafafstand (mm)		
	w _k = 0,4 mm	w _k = 0,3 mm	w _k = 0,2 mm
160	300	300	200
200	300	250	150
240	250	200	100
280	200	150	50
320	150	100	—
360	100	50	—

Voor de opmerkingen zie tabel 7.2N.

maximale staafafstand → 140 mm

Bruikbare breedte → 510 mm

aantal staven → 5 st

h.o.h. Staven → 127,50 mm

maximale staaf afstand < h.o.h afstand? Voldoet

Dwarskracht

Ved 75 kN

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \rightarrow 1,602$$

$$\rho_1 = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} \rightarrow 0,013633$$

$$v_{min} = 0,035 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2} \rightarrow 0,476 \text{ N/mm}^2$$

$$k_1 = 0,15$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{ed}}{A_c} \rightarrow 5,44 \text{ N/mm}^2$$

$$V_{rd,c} (\text{minimum}) = (v_{min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d \rightarrow 465,3 \text{ kN}$$

$$\gamma_c = 1,5$$

$$C_{rd,c} = 0,18 / \gamma_c = 0,12$$

$$V_{rd,c} (\text{maximum}) = (C_{rd,c} \cdot k(100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d \rightarrow 522,0 \text{ kN}$$

$$V_{ed} < V_{rd} ? \rightarrow \text{Voldoet}$$

$$\text{Beugels: tweesnedig} \rightarrow \text{Ø10-250 mm}$$

$$A_{sw} = 157,1 \text{ mm}^2$$

$$s = 250 \text{ mm}$$

$$b_w = 600 \text{ mm}$$

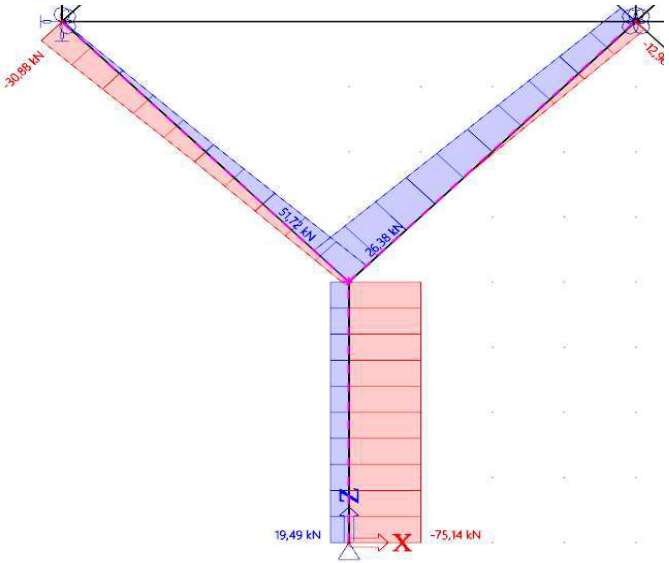
$$\alpha = 21,8 \text{ graden}$$

$$\rho_w = \frac{A_{sw}}{(s \cdot b_w \cdot \sin \alpha)} \rightarrow 0,28\%$$

$$f_{yk} = \text{beton staal B 500} \rightarrow 500$$

$$\rho_{w, \min} = (0,08 \cdot \sqrt{f_{ck}}) / f_{yk} \rightarrow 0,11\%$$
$$\rho_w > \rho_{w, \min} ? \rightarrow \text{Voldoet}$$

BGT; Dwarskracht



$$s = 250 \text{ mm}$$
$$z = 497,25 \text{ mm}$$
$$f_{ywd} = 400 \text{ N/mm}^2$$

$$V_{rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot(\theta) \rightarrow 312,5 \text{ kN}$$

$$V_{ed} = 75 \text{ kN}$$
$$V_{ed} < V_{rd} ? \rightarrow \text{Voldoet}$$

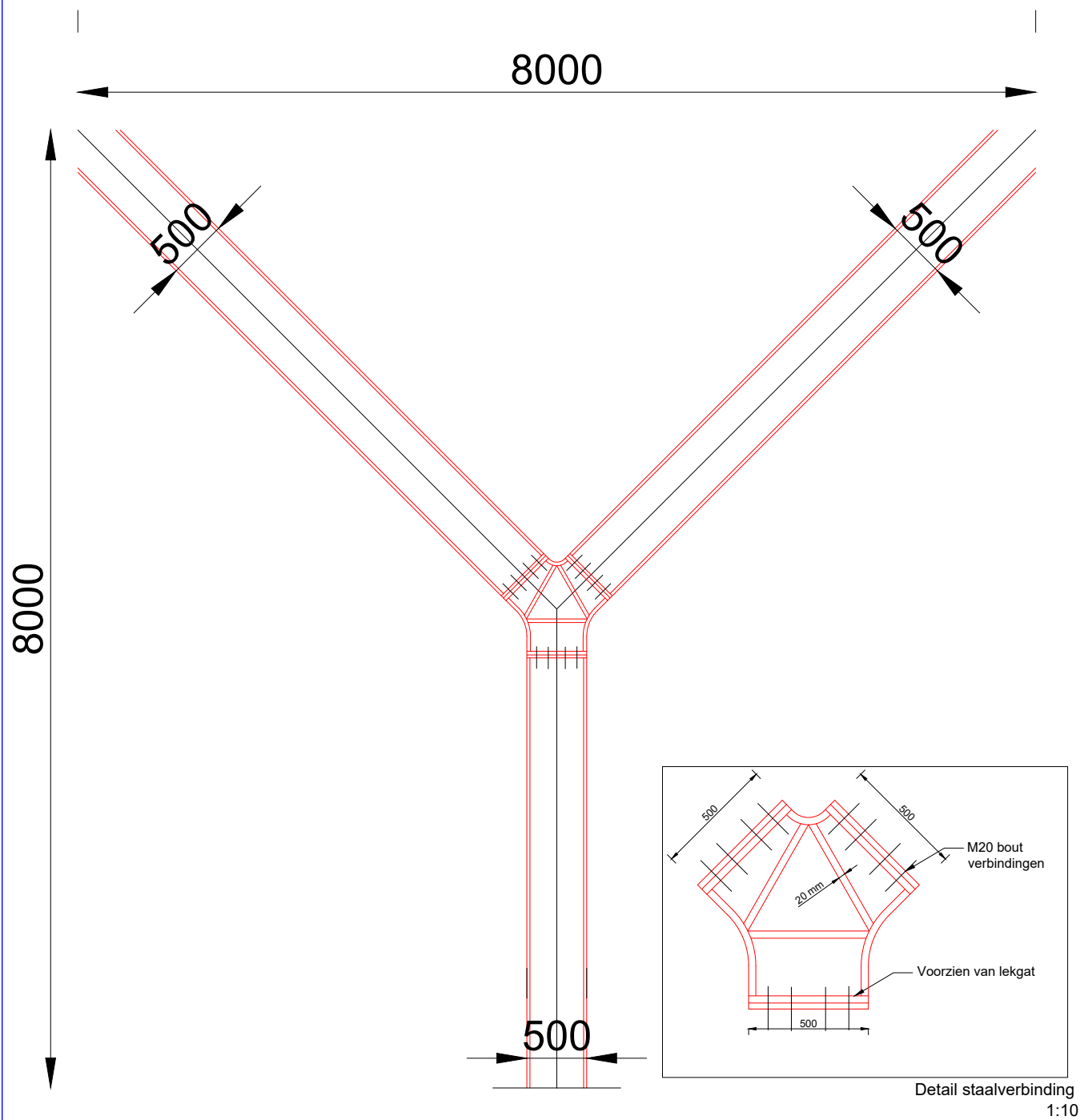
Wapening totaal

Verticale wapening	Asprov	Lengte	Volume
hoofdwapening	4908 mm ²	15,4 m	0,0756 m ³
langs wapening	603 mm ³	15,4 m	0,0186 m ³

Horizontale wapening	Asprov	Lengte	Volume
beugels	499513 mm ³	16 m	0,0080 m ³

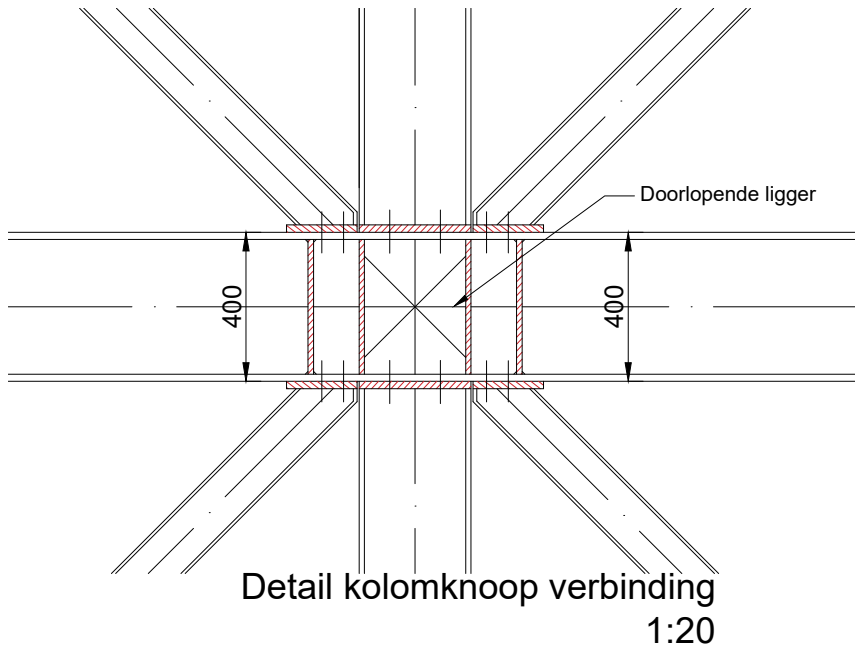
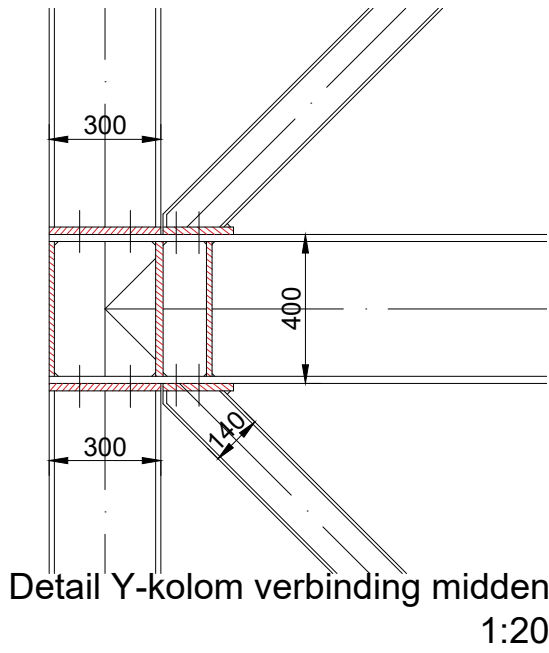
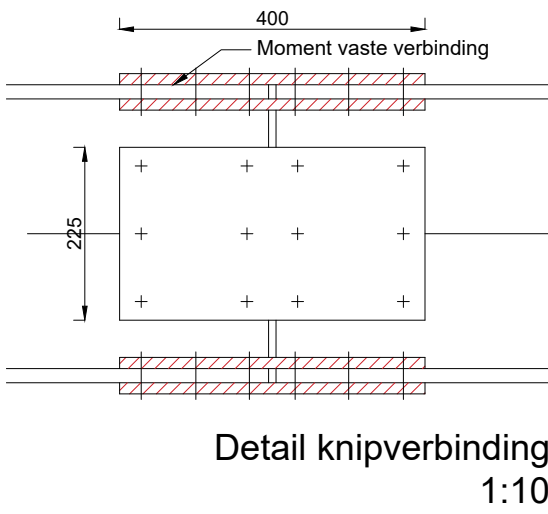
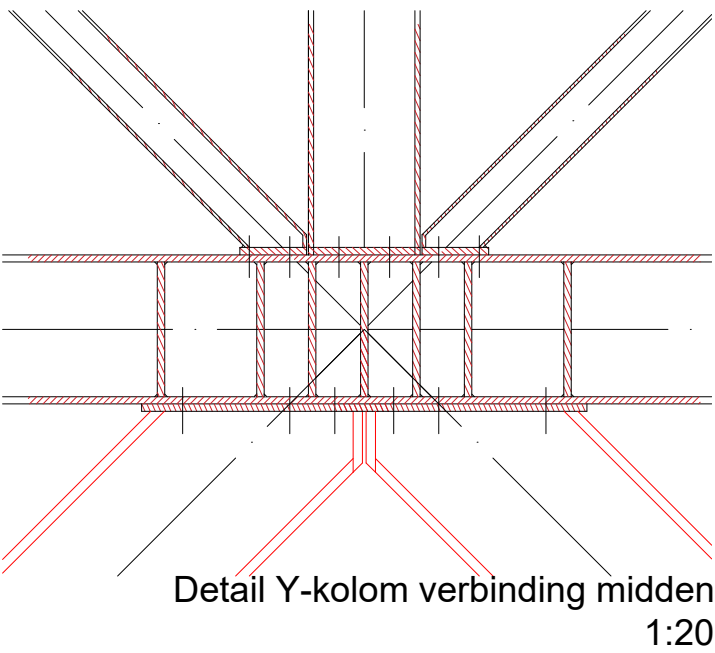
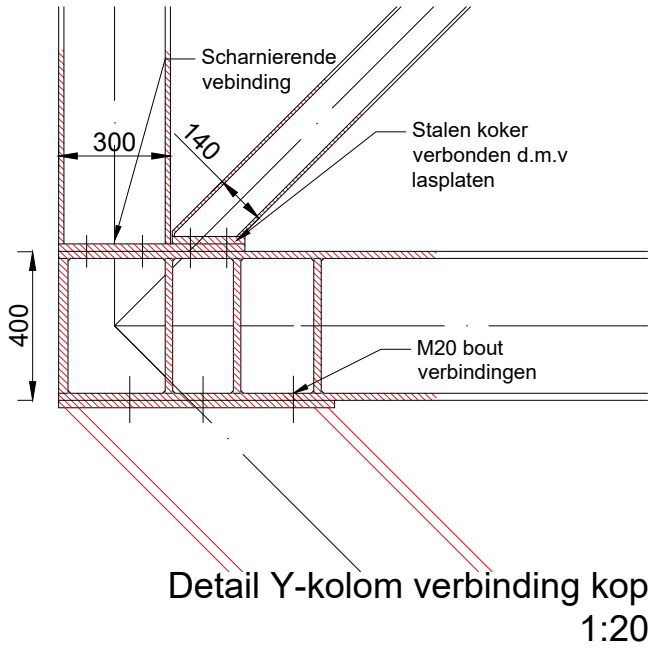
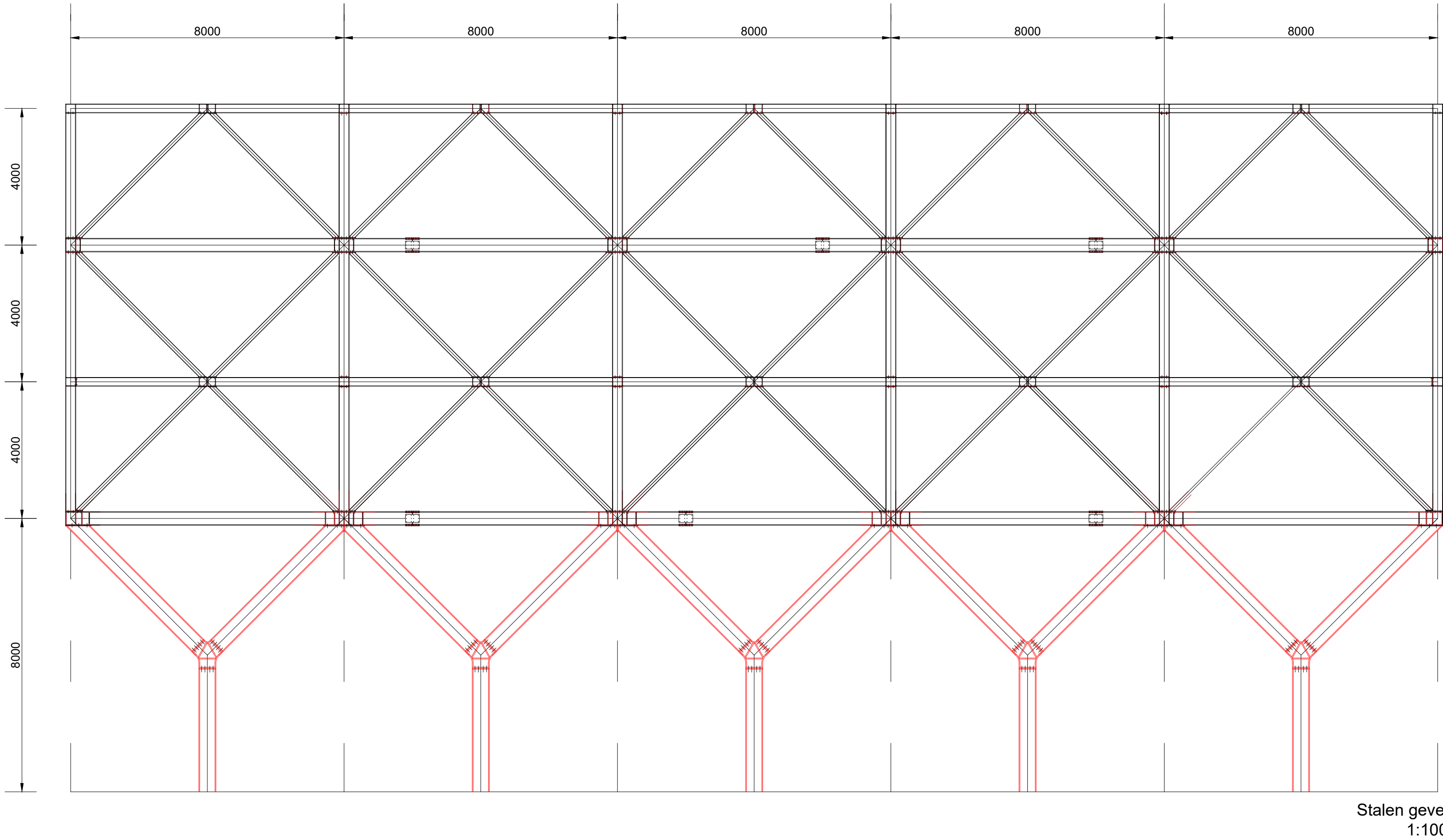
totaal volume wap	gewicht staal ton/m ³	totaal gewicht(ton)
0,1022 m ³	7,85 m ³	0,8 ton

aantal kolommen	totale wapening
7 stuk	5,613337 ton

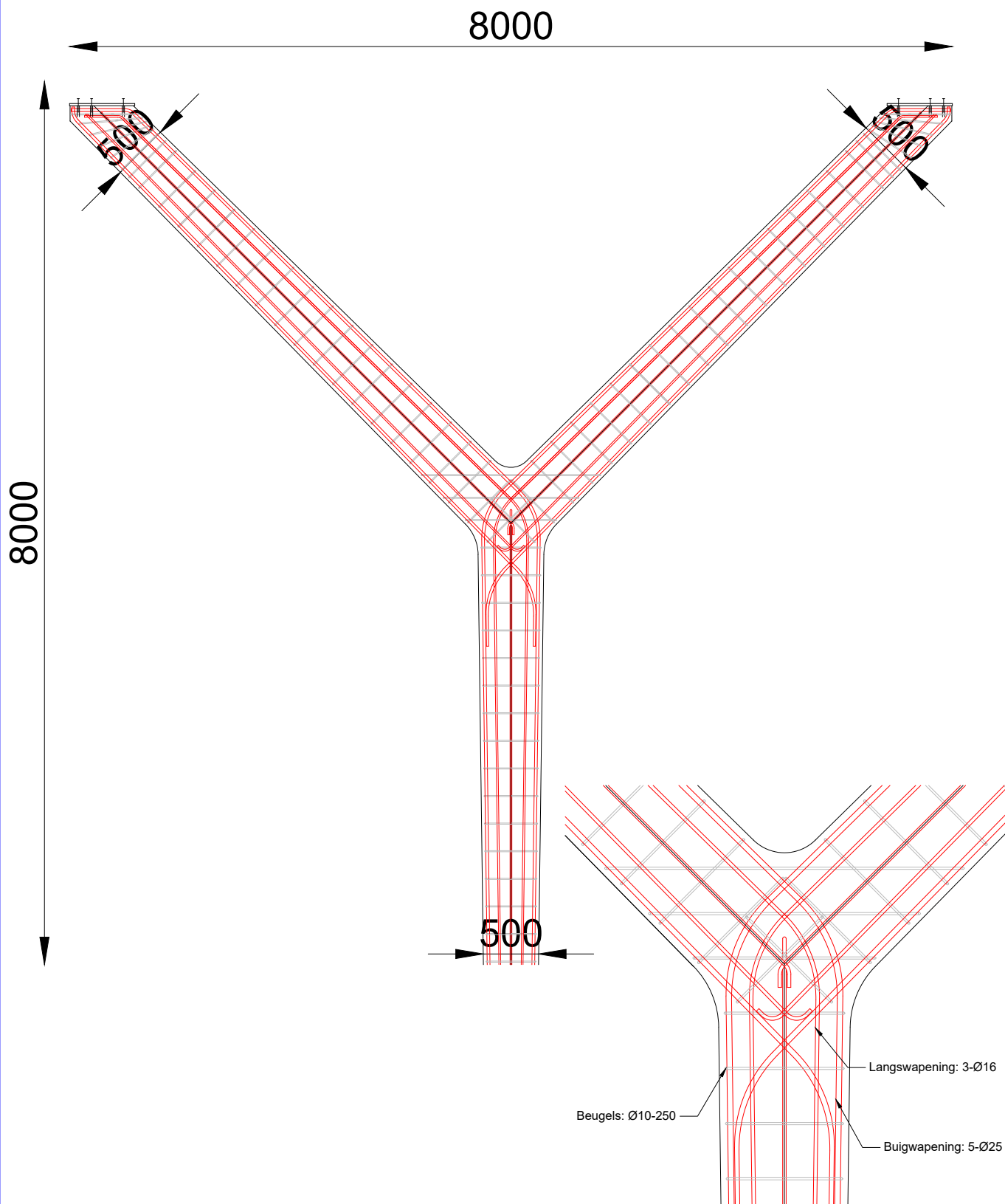


Stalen Y kolom met detail

1



Bijlage IV: Tekening Beton Y- kolom



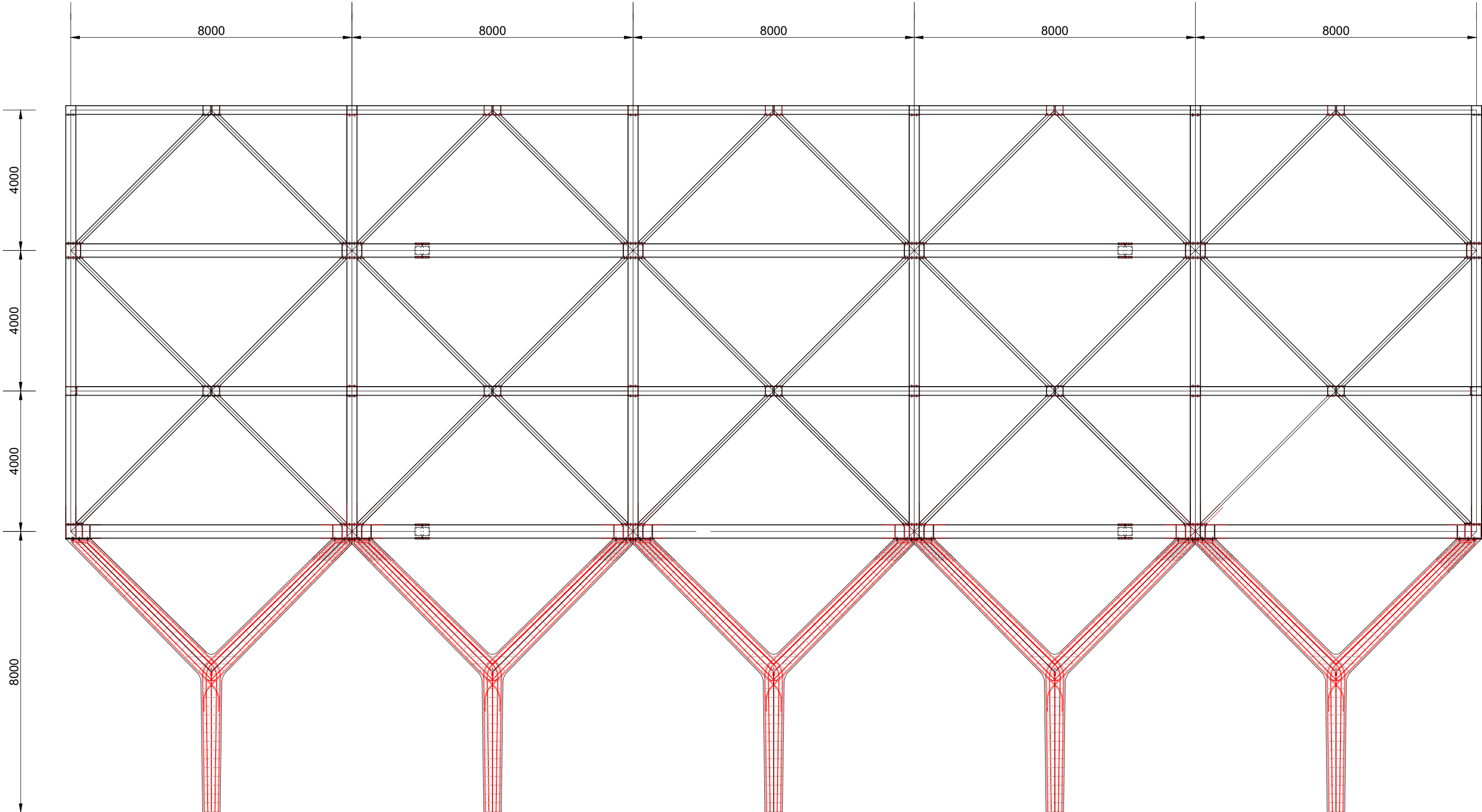
Stalen Y kolom met detail

1

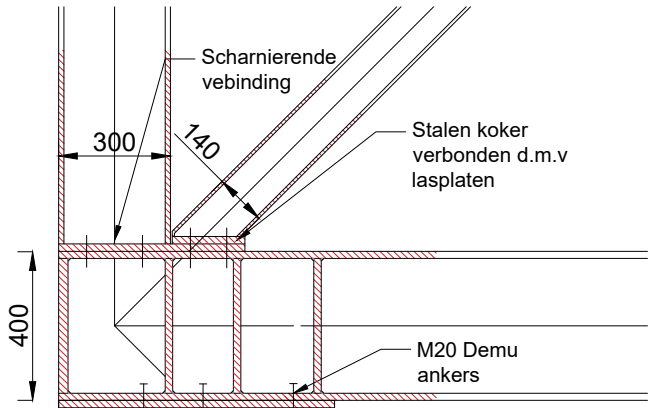
Pieters
BOUWTECHNIEK

schaal	1:20
datum	9-1-2024
wijziging	2
tekenaar	M.Nieman

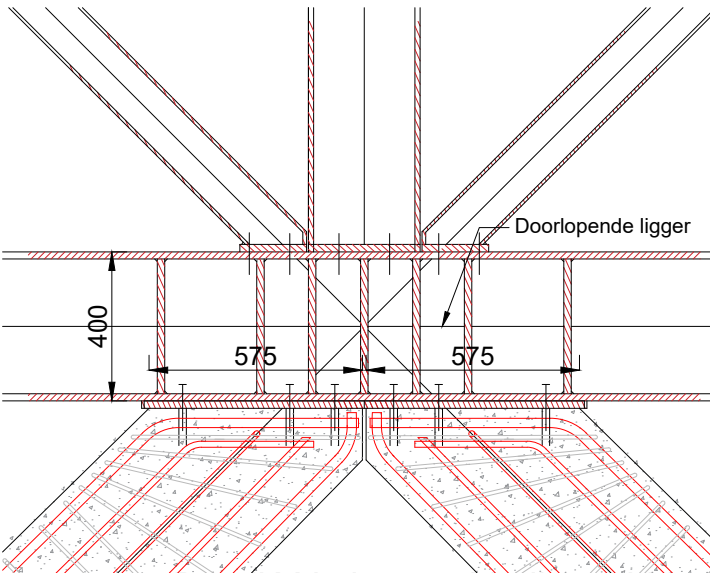
projectnr.	323-093
tekeningnr.	1.0



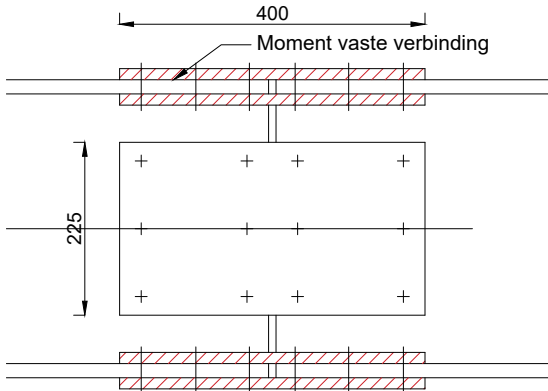
Stalen gevel
1:100



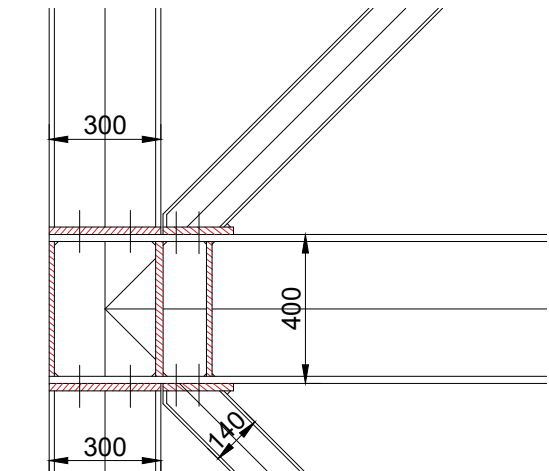
Detail Y-kolom verbinding kop
1:20



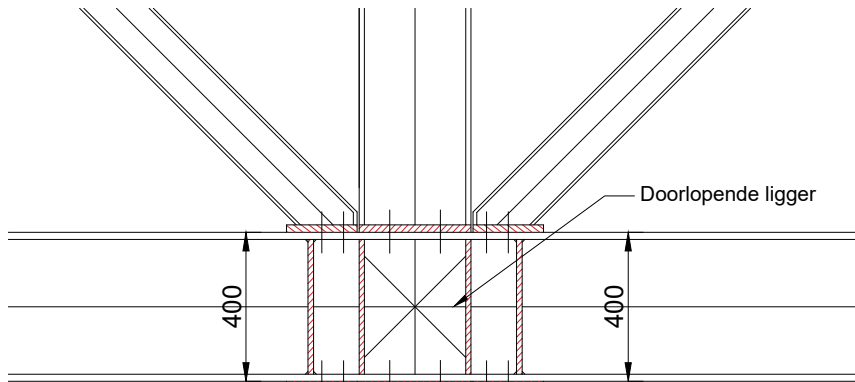
Detail Y-kolom verbinding midden
1:20



Detail knipverbinding
1:10



Detail Y-kolom verbinding midden
1:20



Detail kolomknoop verbinding
1:20

Bijlage V: MKI en MPG berekening varianten

MKI en MPG berekening varianten

Huidige variant groene kanaalplaatvloeren + houten kolommen

 	Onderdeel	MKI (EURO)	eenheid	hoeveelheid	eenhied	totale schaduw kosten	Levensduur (jaar)	MPG	bron:
	Gelamineerde draagconstructie	€ 3,48	per m	1805	m	€ 6.280	100	€ 0,0150	https://milieudatabase.nl/nl/viewer/milieuverklaring/nmd_92464/
	Stalen knoopverbinding	€ 0,12	per kg	57788,0	kg	€ 6.935	100	€ 0,0165	https://milieudatabase.nl/nl/viewer/milieuverklaring/nmd_91230/
	Kanaalplaat vloeren 260 mm	€ 4,71	per m2	4379	m2	€ 20.625	100	€ 0,0491	EPD VBI
	Wapening druklaag	€ 213,02	per ton	36,43	ton	€ 7.761	100	€ 0,0185	https://milieudatabase.nl/nl/viewer/milieuverklaring/nmd_45791/
	Druklaag excl wapening	€ 4,06	per m2	4379	m2	€ 17.779	100	€ 0,0423	https://milieudatabase.nl/nl/viewer/milieuverklaring/nmd_27253/
	MKI Totaal					€ 59.379	MPG totaal	€ 0,1414	

CLT Variant STAAL 60 % hergebruik

 	Onderdeel	MKI (EURO)	eenheid	hoeveelheid	eenhied	totale schaduw kosten	Levensduur (jaar)	MPG	bron:
	CLT vloeren	€ 0,35	per m2	4379	m2	€ 1.533	100	€ 0,0037	https://milieudatabase.nl/nl/viewer/milieuverklaring/nmd_66360/
	Fermacel panelen	€ 0,68	per m2	4379	m2	€ 2.978	50	€ 0,0142	https://milieudatabase.nl/nl/viewer/milieuverklaring/nmd_93234/
	Stalen draagcon 60% hergebruik	€ 0,06	per kg	345049	kg	€ 20.703	100	€ 0,0493	https://milieudatabase.nl/nl/viewer/milieuverklaring/nmd_94099/
	Promatect brandpanelen	€ 2,48	per m2	3478	m2	€ 8.624	60	€ 0,0342	https://milieudatabase.nl/nl/viewer/milieuverklaring/nmd_93989/
	Zwevende dekvloer	€ 1,14	per m2	4379	m2	€ 4.992	75	€ 0,02	https://milieudatabase.nl/nl/viewer/milieuverklaring/nmd_36730/
	MKI Totaal					€ 38.830	MPG totaal	€ 0,117	

CLT Variant STAAL 90 % hergebruik

 	Onderdeel	MKI (EURO)	eenheid	hoeveelheid	eenhied	totale schaduw kosten	Levensduur (jaar)	MPG	bron:
	CLT vloeren	€ 0,35	per m2	4379	m2	€ 1.533	100	€ 0,0037	https://milieudatabase.nl/nl/viewer/milieuverklaring/nmd_66360/
	Fermacel panelen	€ 0,68	per m2	4379	m2	€ 2.978	50	€ 0,0142	https://milieudatabase.nl/nl/viewer/milieuverklaring/nmd_93234/
	Stalen draagcon 60% hergebruik	€ 0,02	per kg	345049	kg	€ 6.901	100	€ 0,0164	https://milieudatabase.nl/nl/viewer/milieuverklaring/nmd_92325/
	Promatect brandpanelen	€ 2,48	per m2	3478	m2	€ 8.624	60	€ 0,0342	https://milieudatabase.nl/nl/viewer/milieuverklaring/nmd_93989/
	Zwevende dekvloer	€ 1,14	per m2	4379	m2	€ 4.992	75	€ 0,02	https://milieudatabase.nl/nl/viewer/milieuverklaring/nmd_36730/
	MKI Totaal					€ 25.028	MPG totaal	€ 0,084	

CLT beton variant (alleen Y kolom beton)

 	Onderdeel	MKI (EURO)	eenheid	hoeveelheid	eenhied	totale schaduw kosten	Levensduur (jaar)	MPG	bron:
	Prefab beton Y kolommen	€ 25,62	per m	112	m	€ 2.869	100	€ 0,0068	https://milieudatabase.nl/nl/viewer/milieuverklaring/nmd_10826/
	Wapening	€ 213,02	per ton	5,61	ton	€ 1.196	100	€ 0,0028	https://milieudatabase.nl/nl/viewer/milieuverklaring/nmd_45791/
	Draagconstructie (staal)	€ 0,06	per kg	325049	kg	€ 19.503	100	€ 0,0464	https://milieudatabase.nl/nl/viewer/milieuverklaring/nmd_94099/
	CLT vloeren	€ 0,35	per m2	4379	m2	€ 1.533	100	€ 0,0037	https://milieudatabase.nl/nl/viewer/milieuverklaring/nmd_66360/
	Zwevende dekvloer	€ 1,14	per m2	4379	m2	€ 4.992	75	€ 0,0159	https://milieudatabase.nl/nl/viewer/milieuverklaring/nmd_36730/
	Fermacel panelen	€ 0,68	per m2	4379	m2	€ 2.978	50	€ 0,0142	https://milieudatabase.nl/nl/viewer/milieuverklaring/nmd_93234/
	Promatect brandpanelen	€ 2,48	per m2	3298	m2	€ 8.178	60	€ 0,0325	https://milieudatabase.nl/nl/viewer/milieuverklaring/nmd_93989/
	MKI Totaal					€ 41.249	MPG totaal	€ 0,1223	

Variant staal+ kanaalplaat

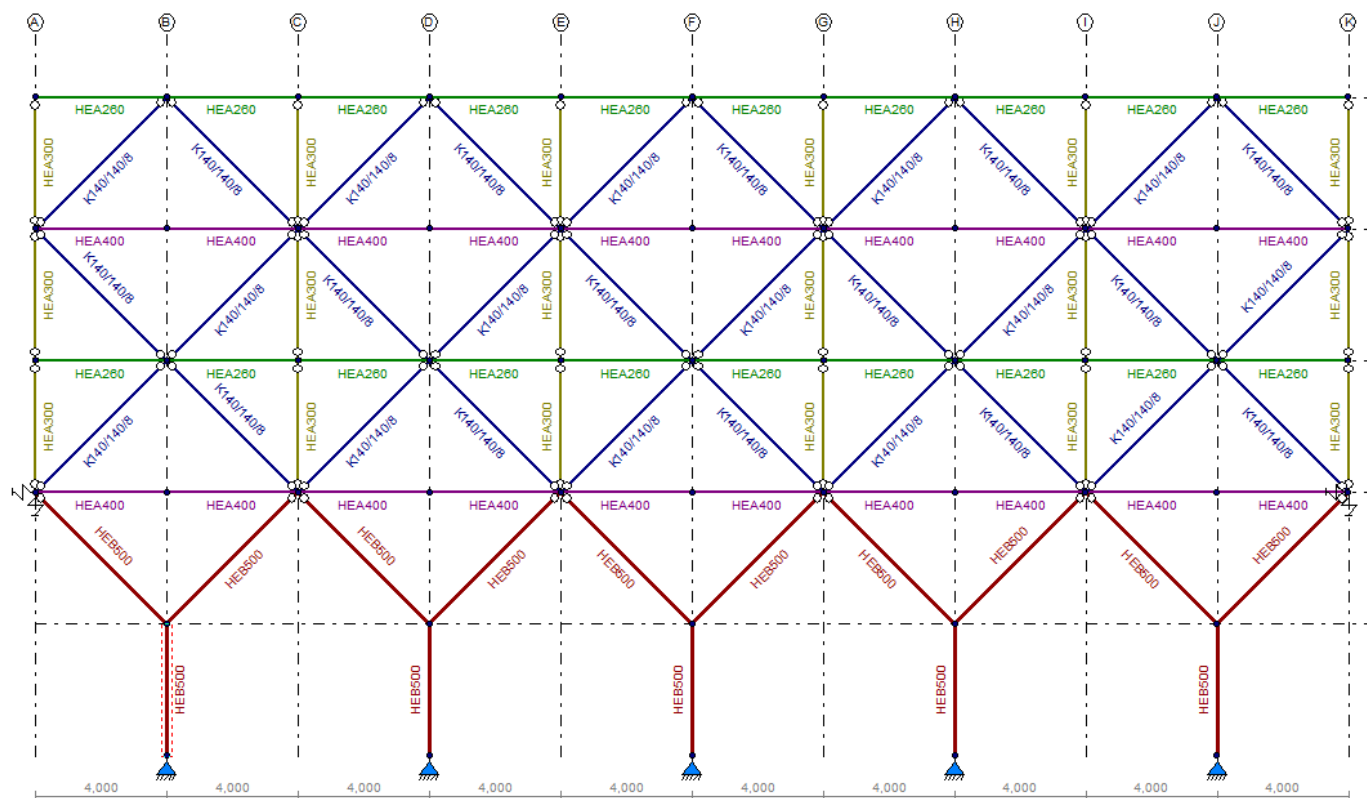
	Onderdeel	MKI (EURO)	eenheid	hoeveelheid	eenhied	totale schaduw kosten	Levensduur (jaar)	MPG	bron:
	Stalen draagconstructie	€ 0,06	per kg	396498	kg	€ 23.790	100	€ 0,0567	https://milieudatabase.nl/nl/viewer/milieuverklaring/nmd_90901/
	Promatect brandpanelen	€ 2,48	per m2	3651	m2	€ 9.056	60	€ 0,0359	https://milieudatabase.nl/nl/viewer/milieuverklaring/nmd_93989/
	Kanaalplaat vloeren	€ 4,71	per m2	4379	m2	€ 20.625	100	€ 0,0491	EPD VBI
	Druklaag excl. wapening	€ 4,06	per m2	4379	m2	€ 17.779	100	€ 0,0423	https://milieudatabase.nl/nl/viewer/milieuverklaring/nmd_27253/
	Wapening	€ 213,02	per ton	36,43	ton	€ 7.761	100	€ 0,0185	https://milieudatabase.nl/nl/viewer/milieuverklaring/nmd_45791/
	MKI Totaal					€ 79.010	MPG totaal	€ 0,2025	

Bruto vloer oppervlak volgens NEN 2580 4199 m^2

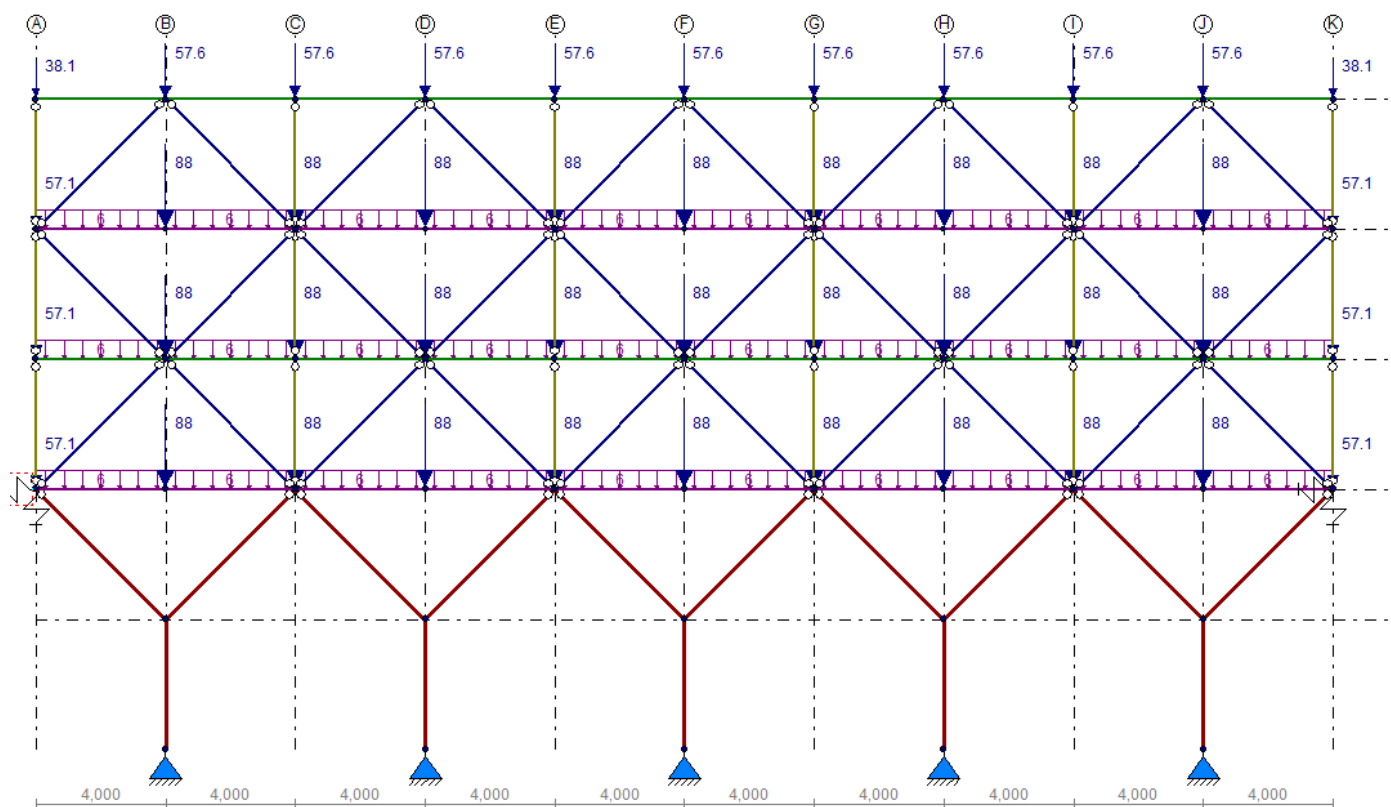
Bijlage VI: Toetsing varianten CLT vloeren en stalen draagconstructie

Voorgevel

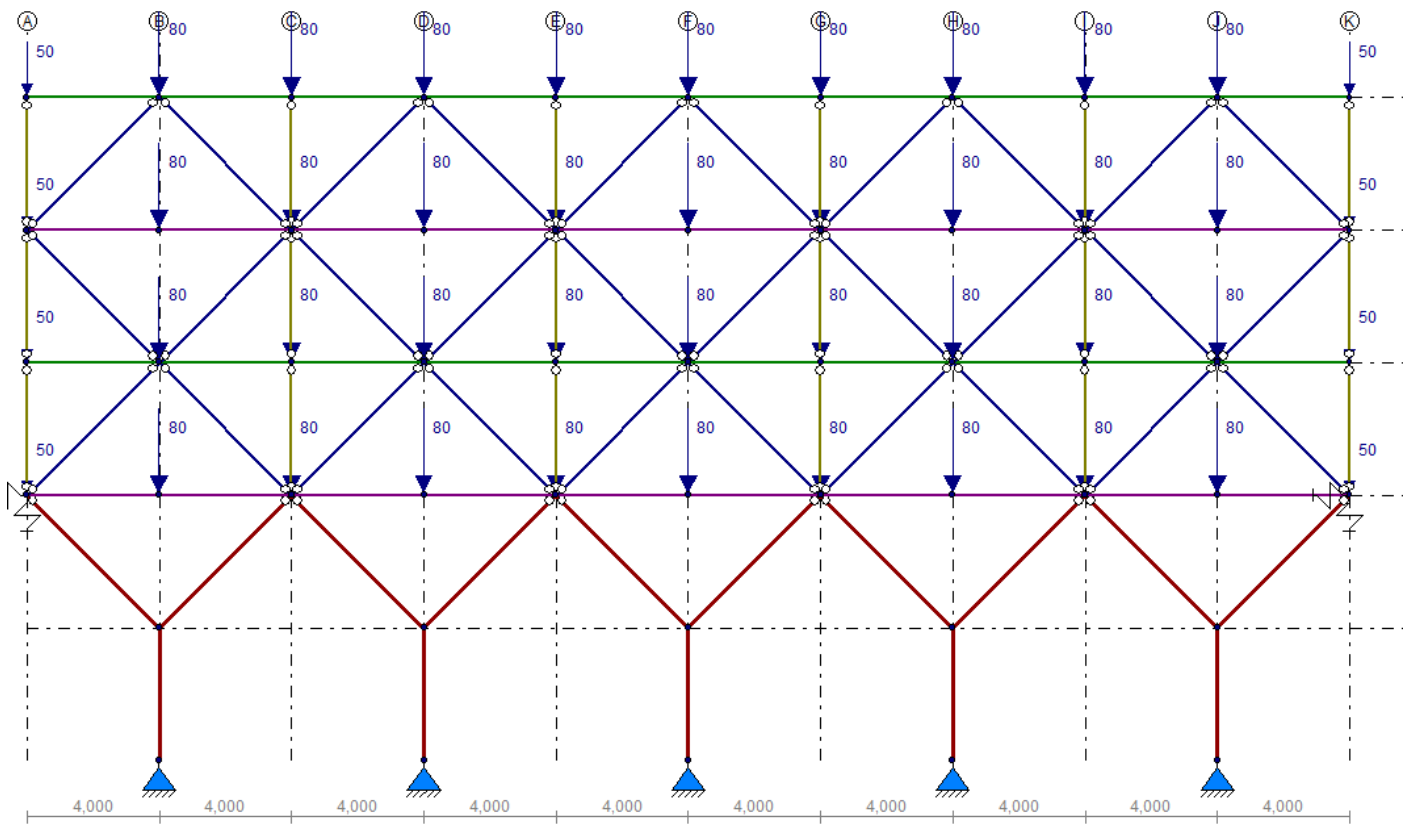
Mechanica schema:



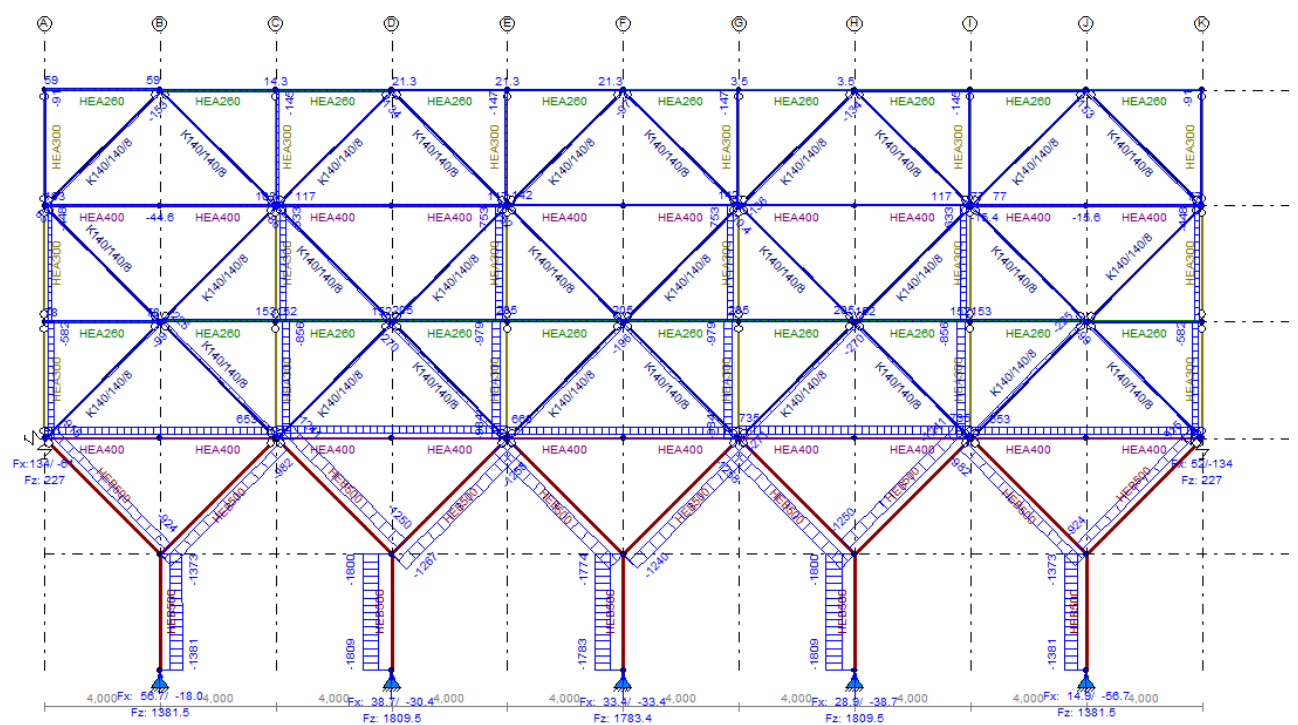
Permanente belasting:



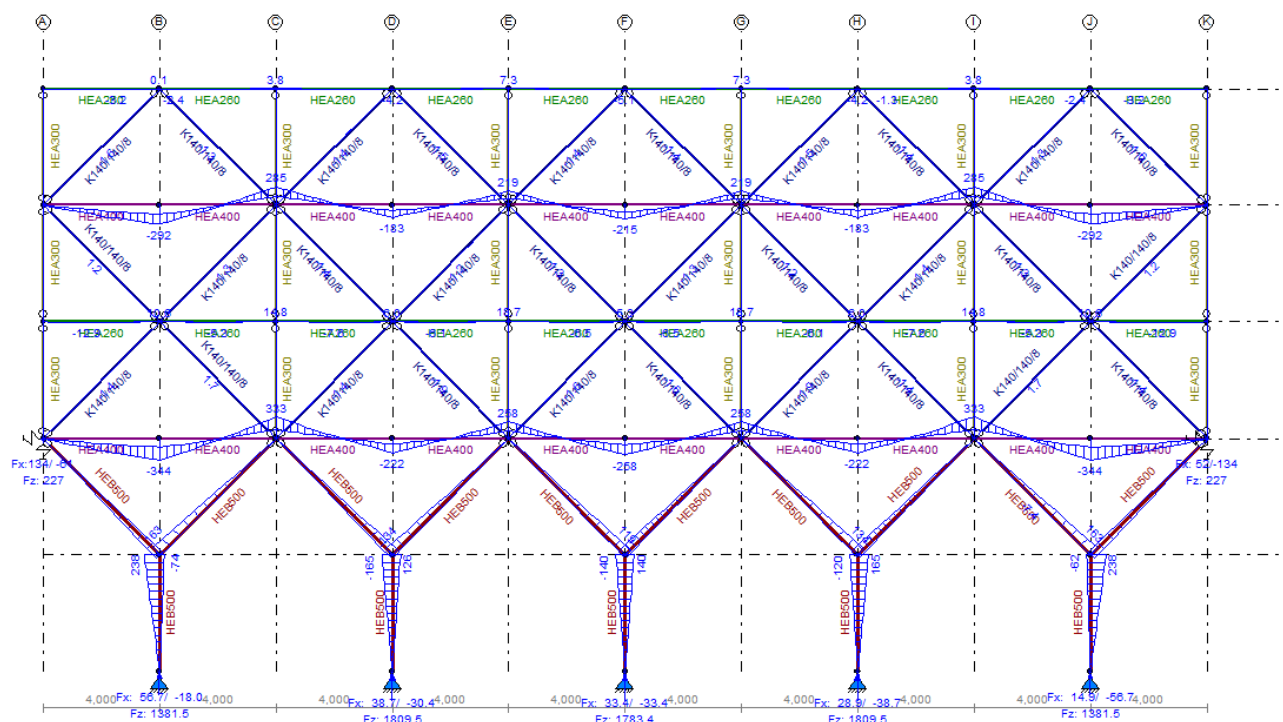
Veranderlijke belasting:



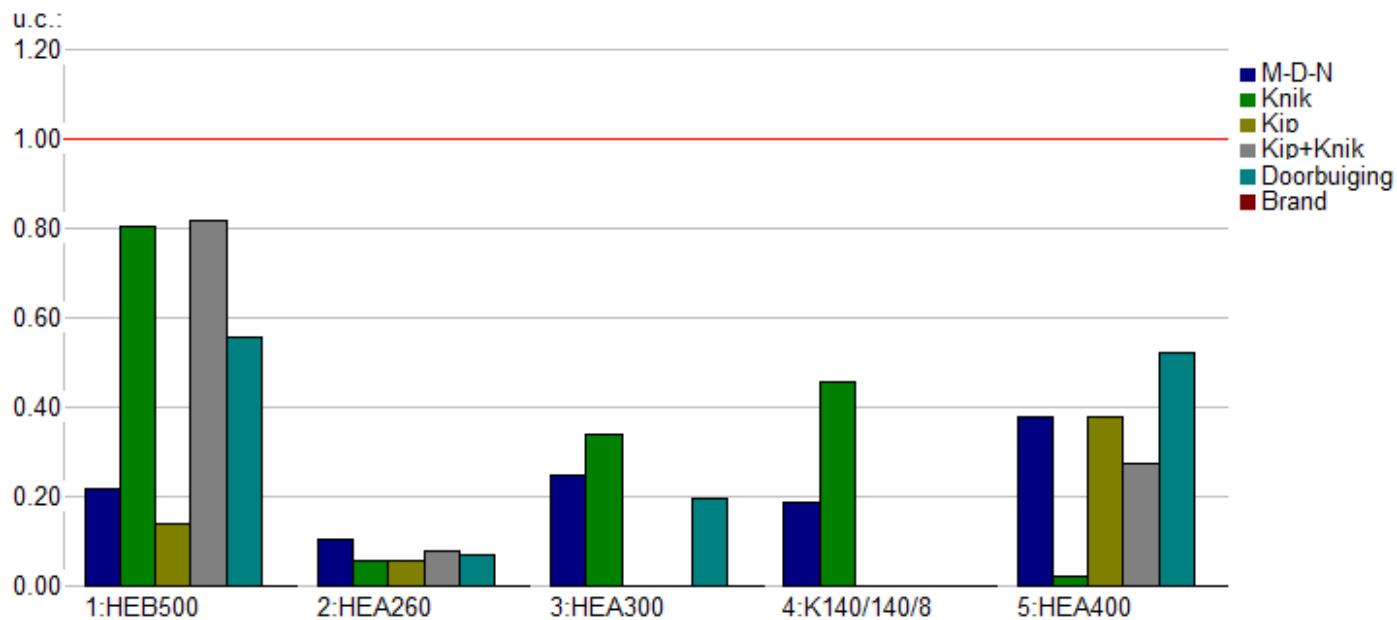
NORMAALKRACHTEN 2e orde Fundamentele combinatie



MOMENTEN 2e orde Fundamentele combinatie

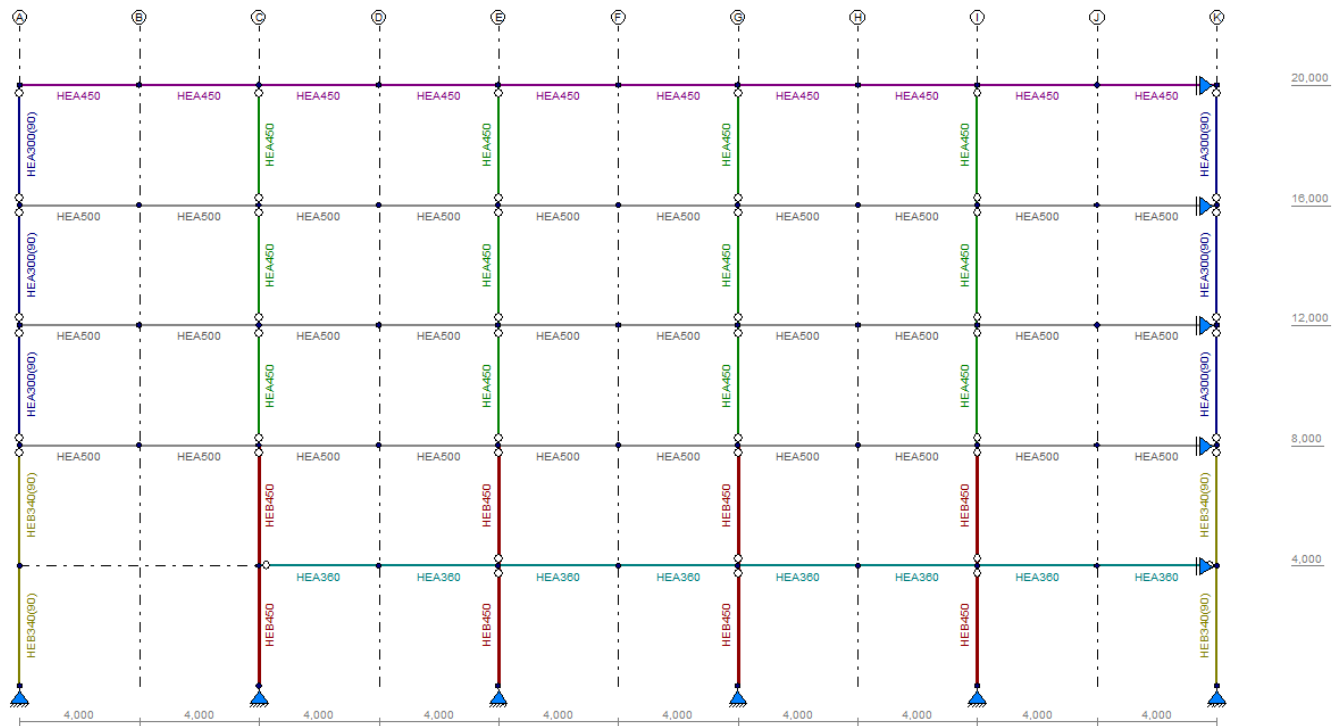


Unity check:

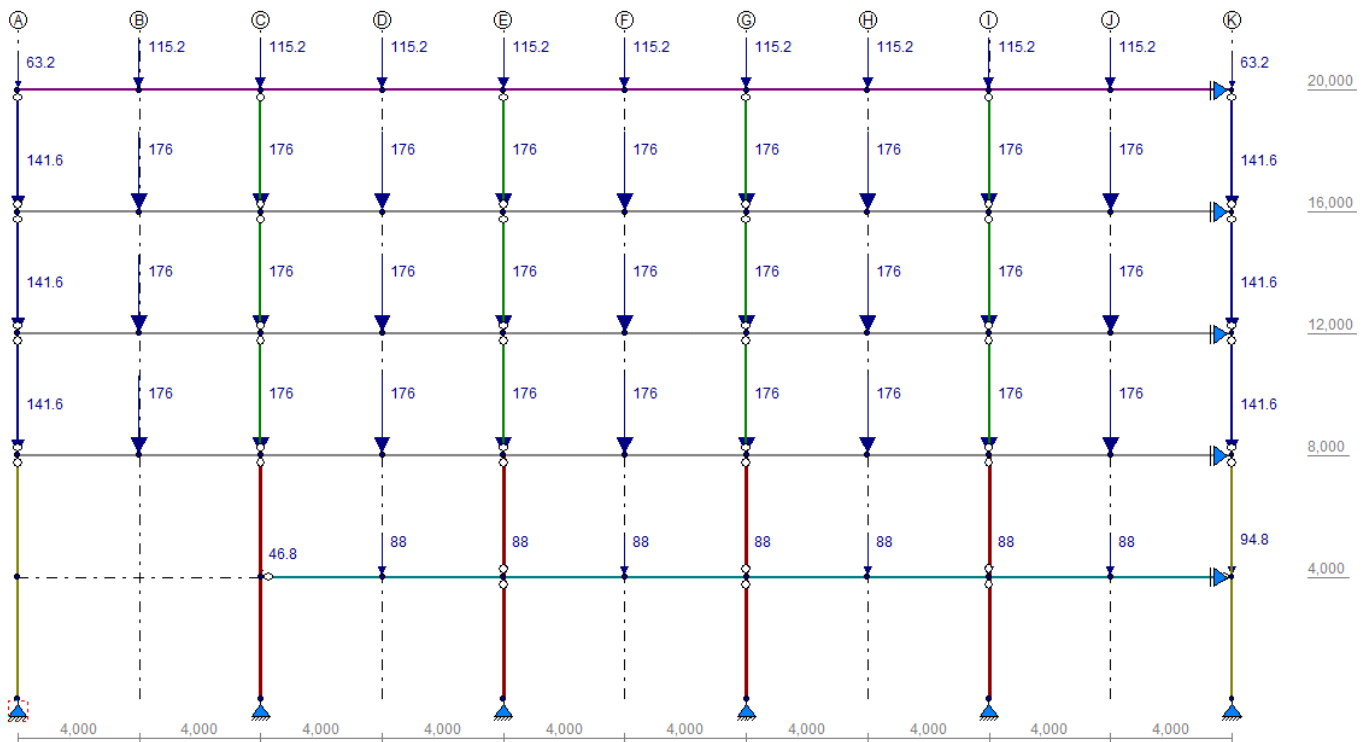


AS 100

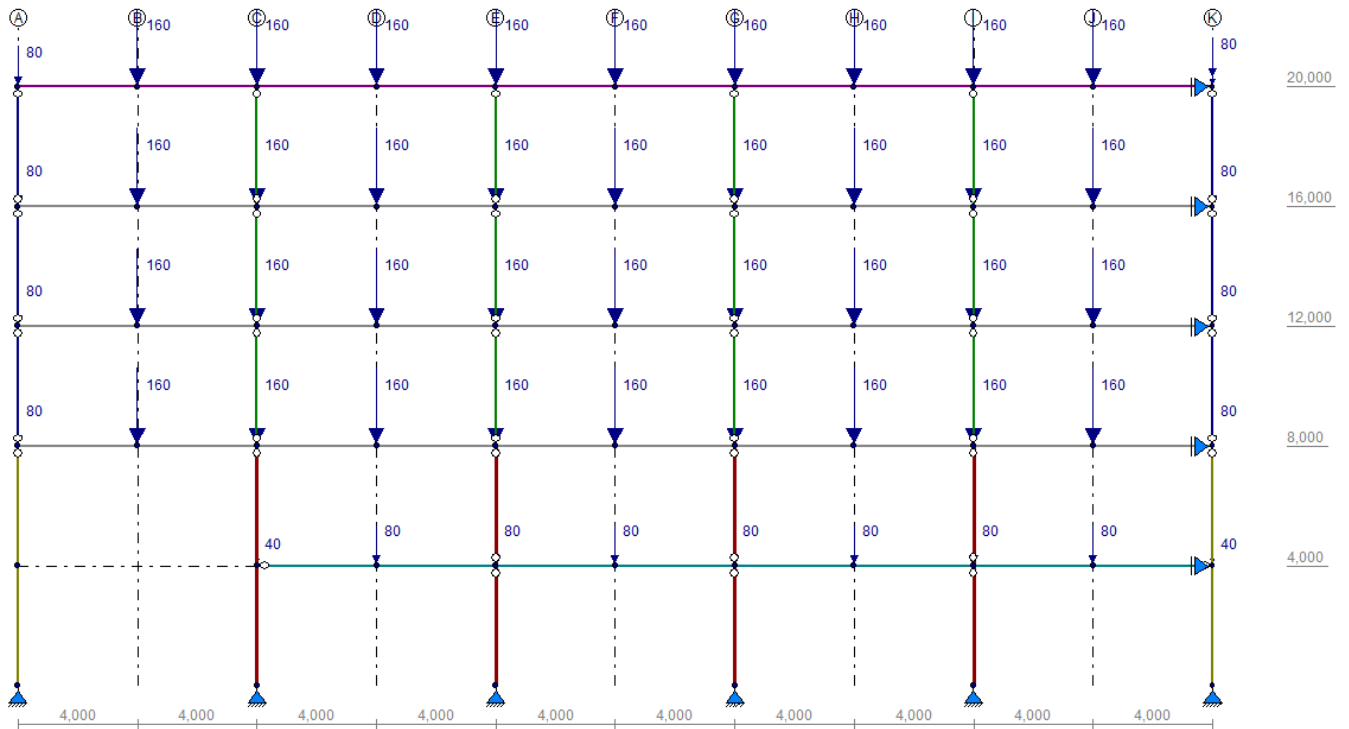
Mechanica schema:



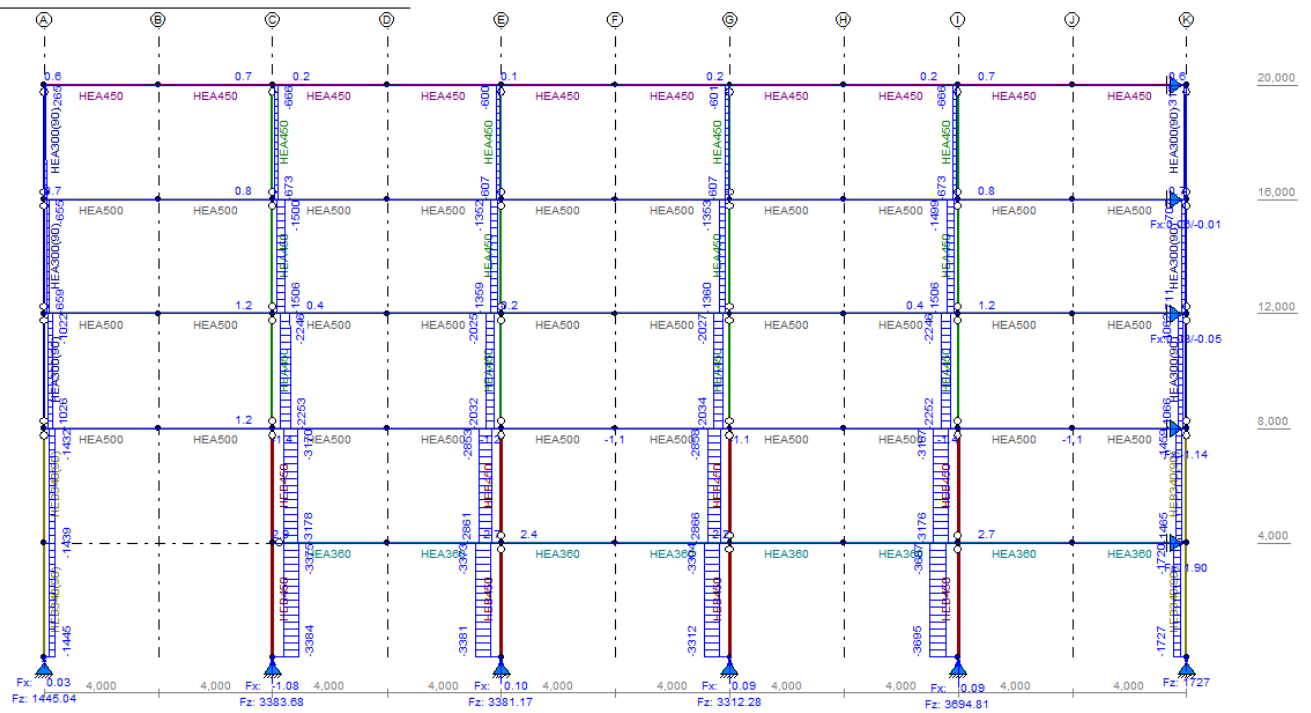
Permanente belasting:



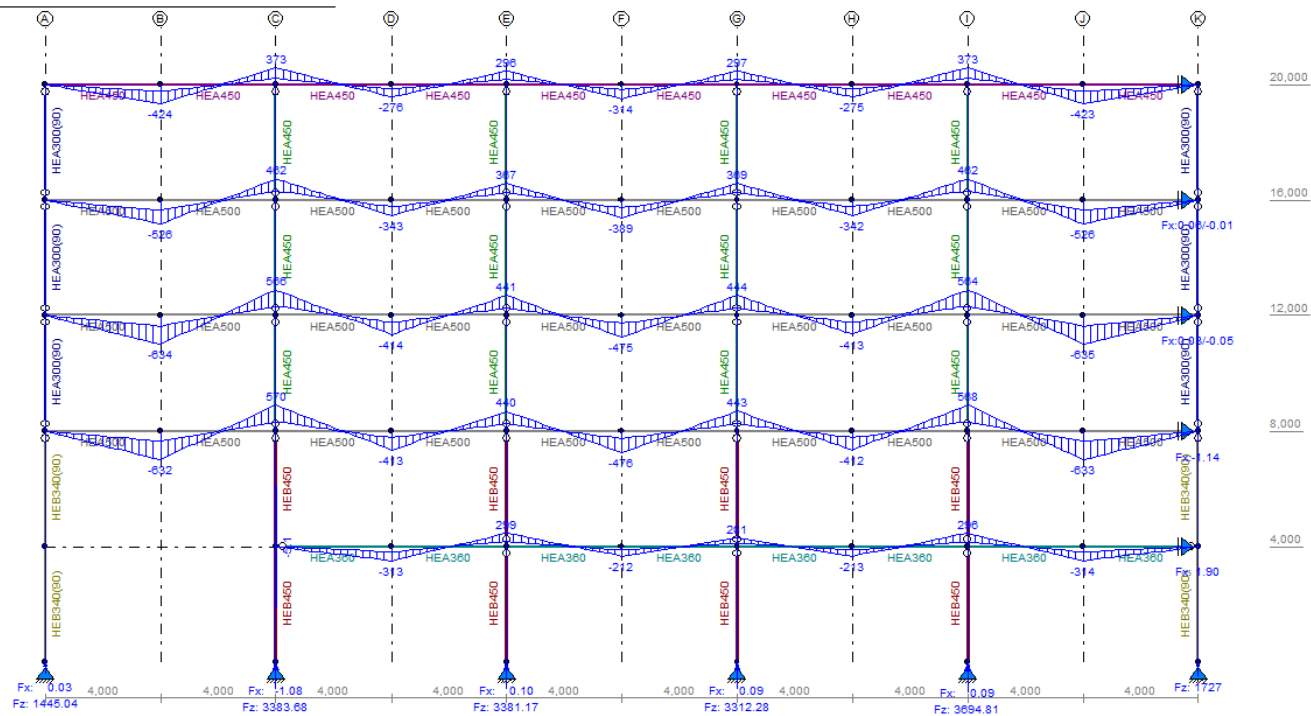
Veranderlijke belasting:



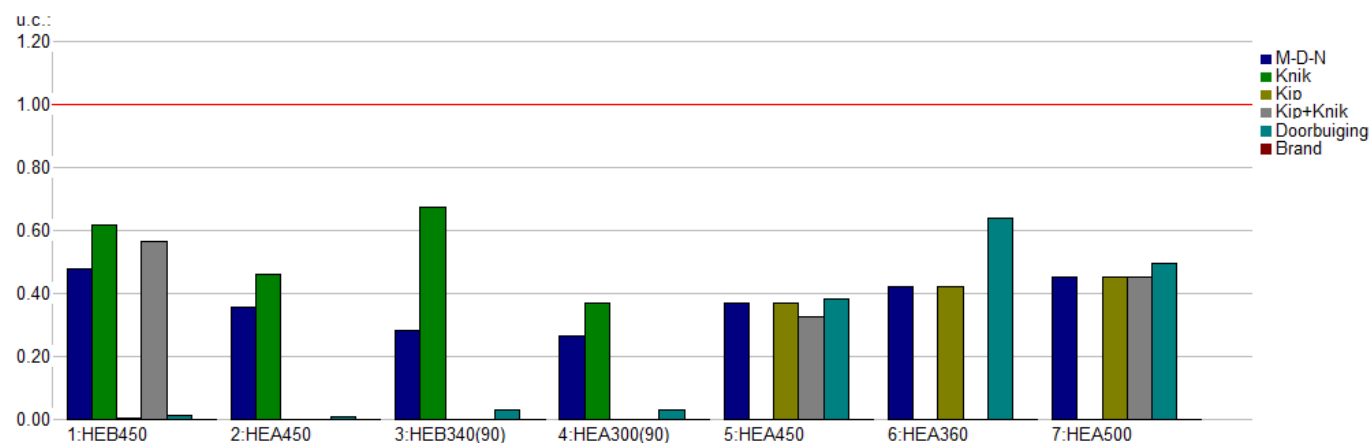
NORMAALKRACHTEN 2e orde Fundamentele combinatie

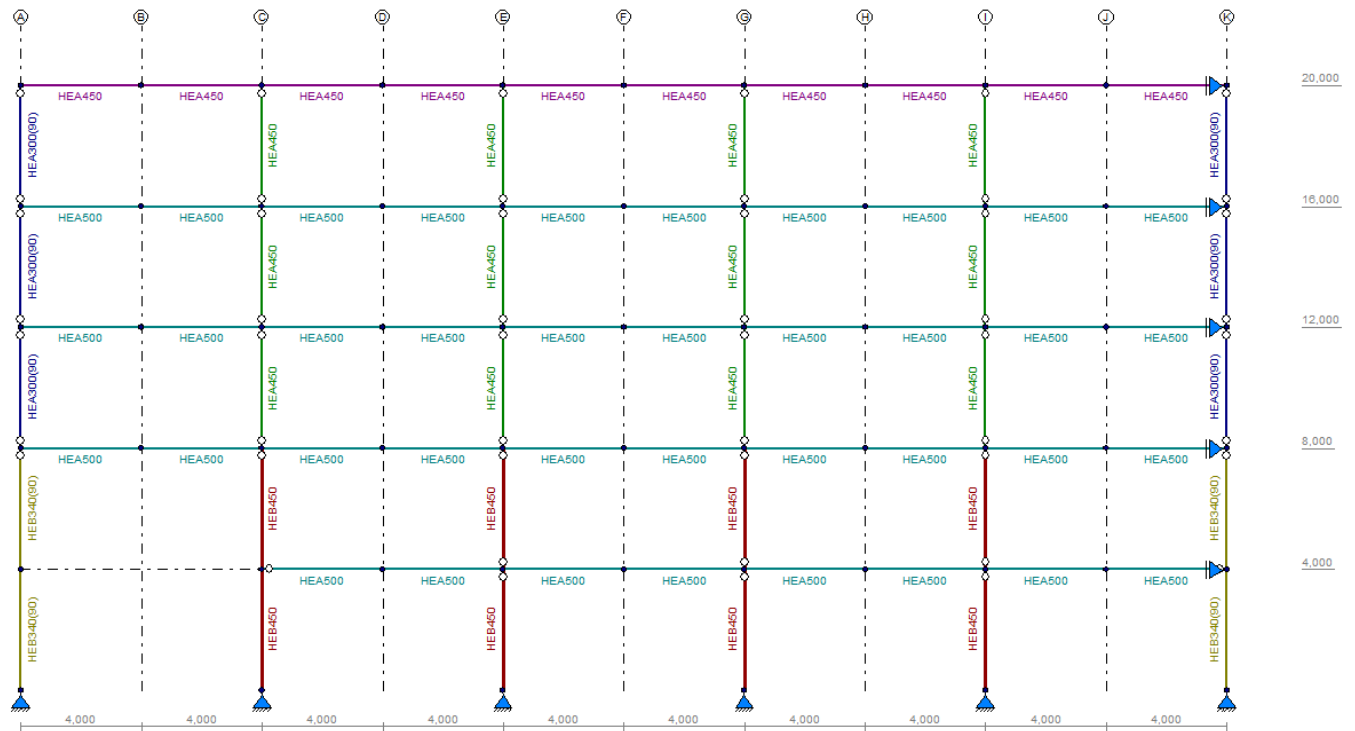
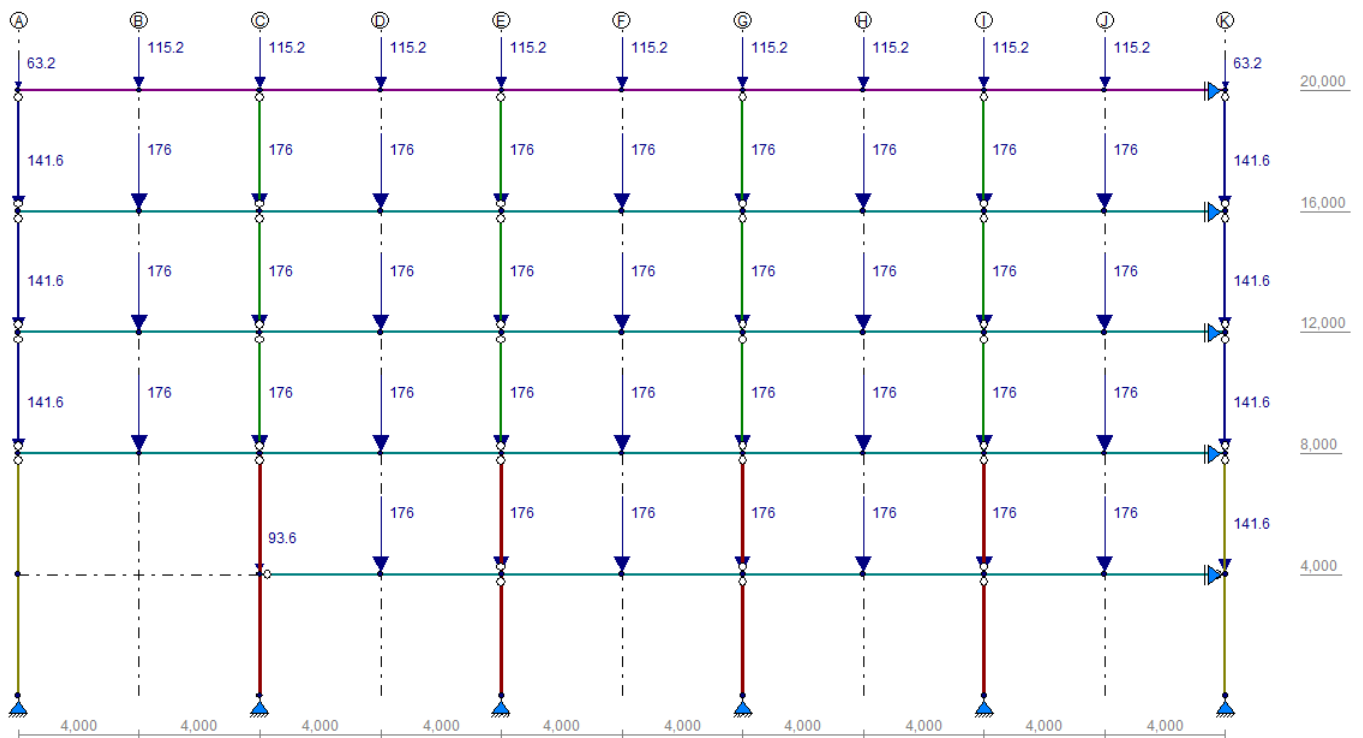


MOMENTEN 2e orde Fundamentele combinatie

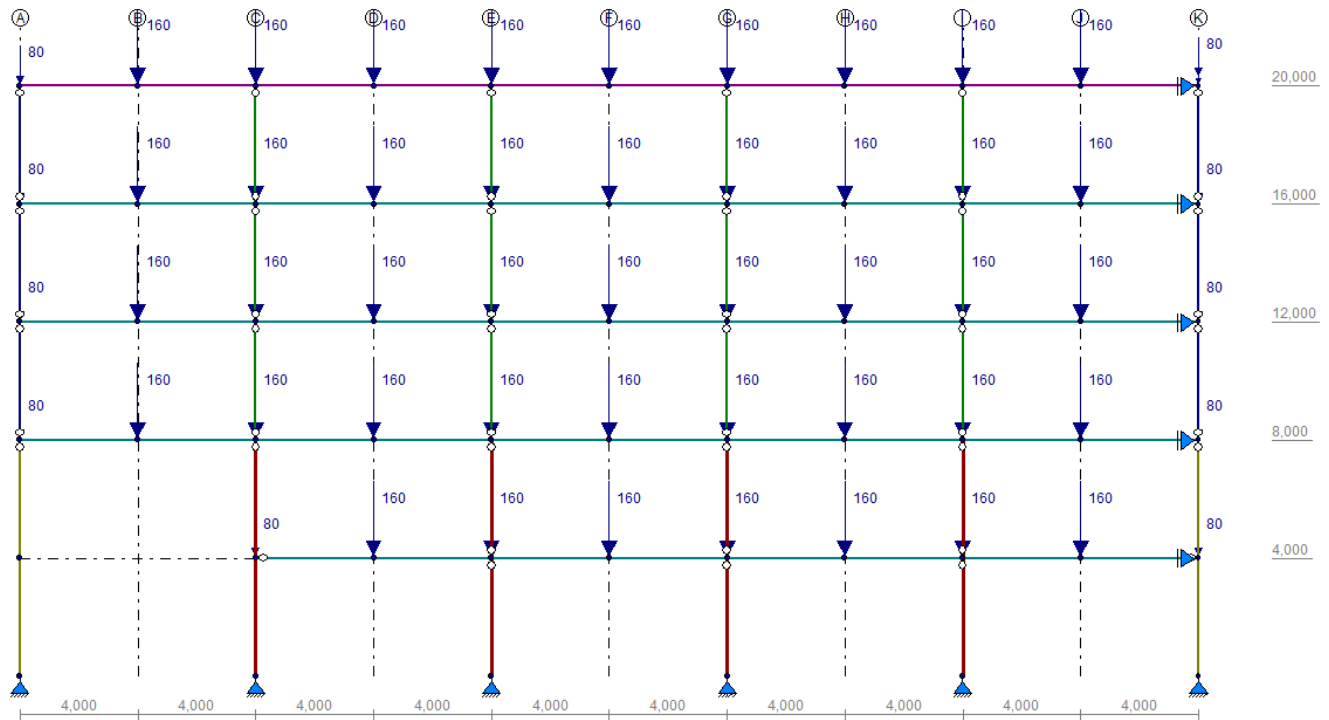


Unity check:

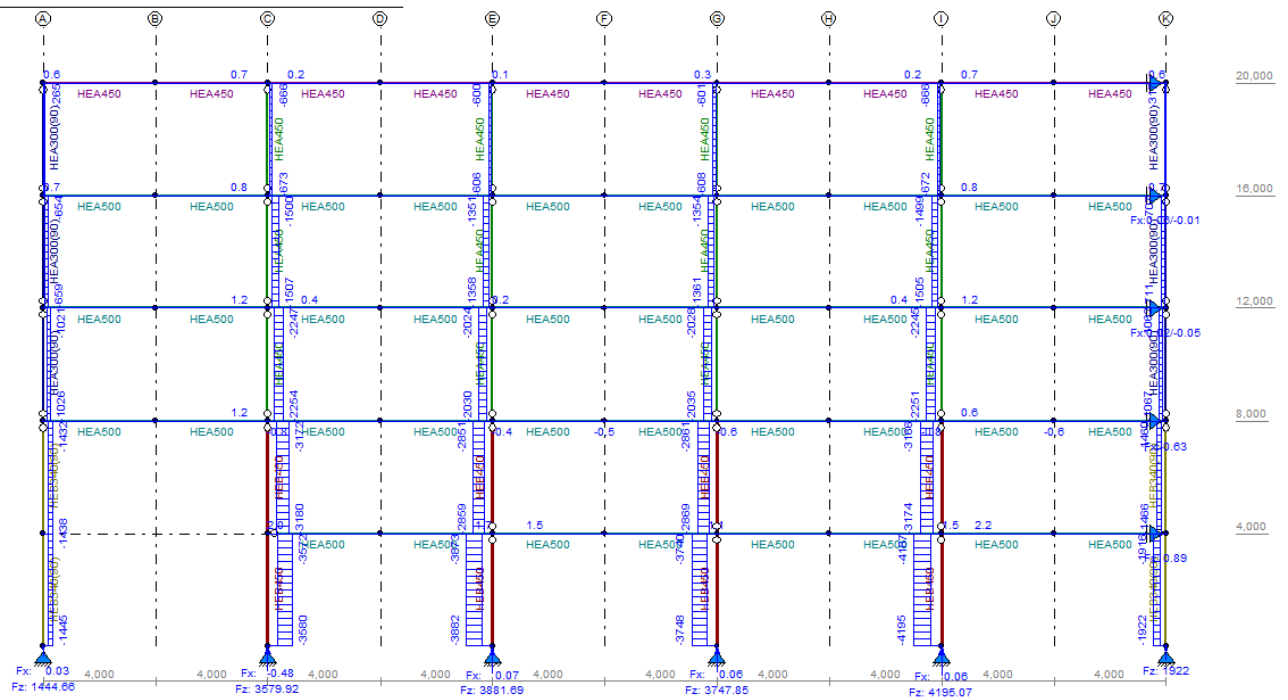


Mechanica schema:Permanente belasting:

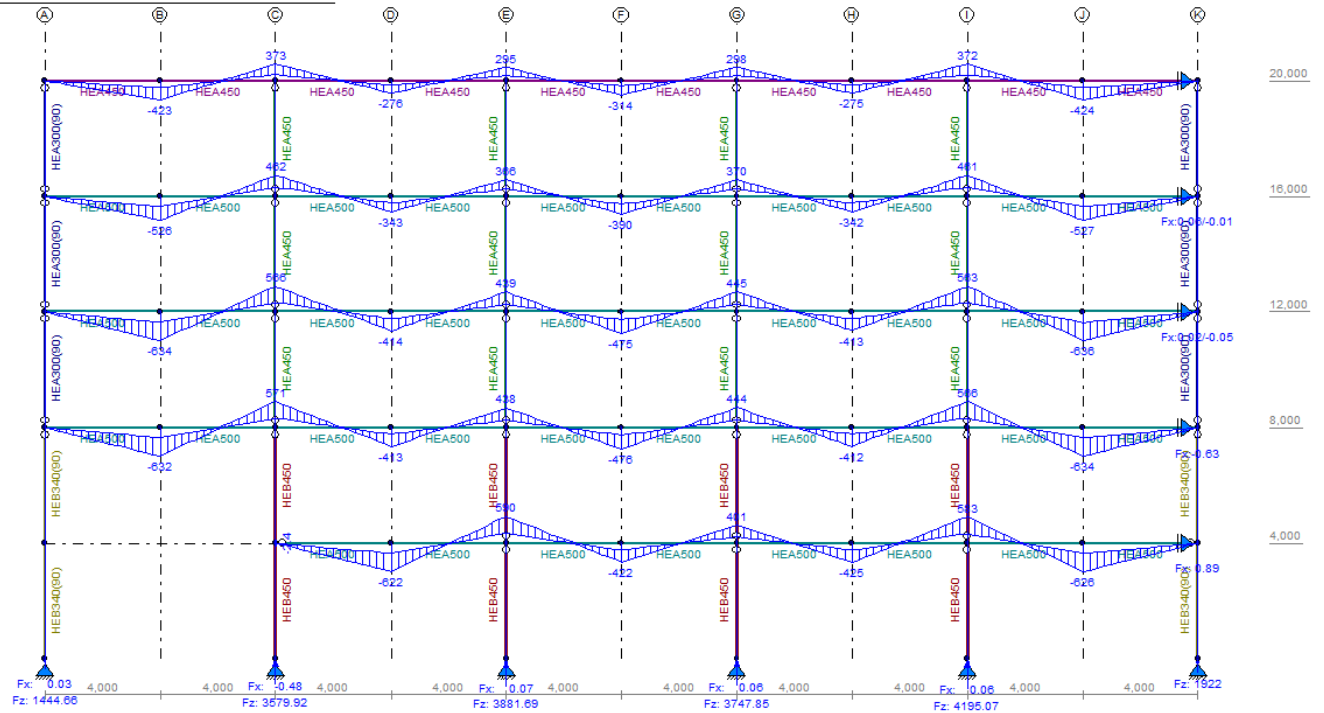
Veranderlijke belasting:



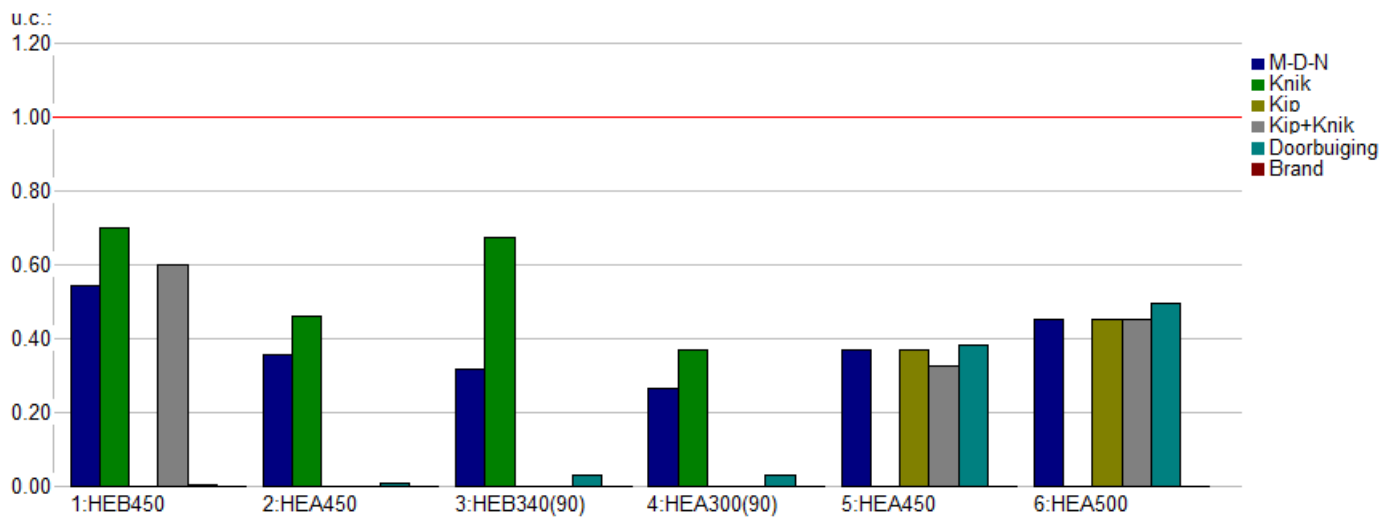
NORMAALKRACHTEN 2e orde Fundamentele combinatie



MOMENTEN 2e orde Fundamentele combinatie

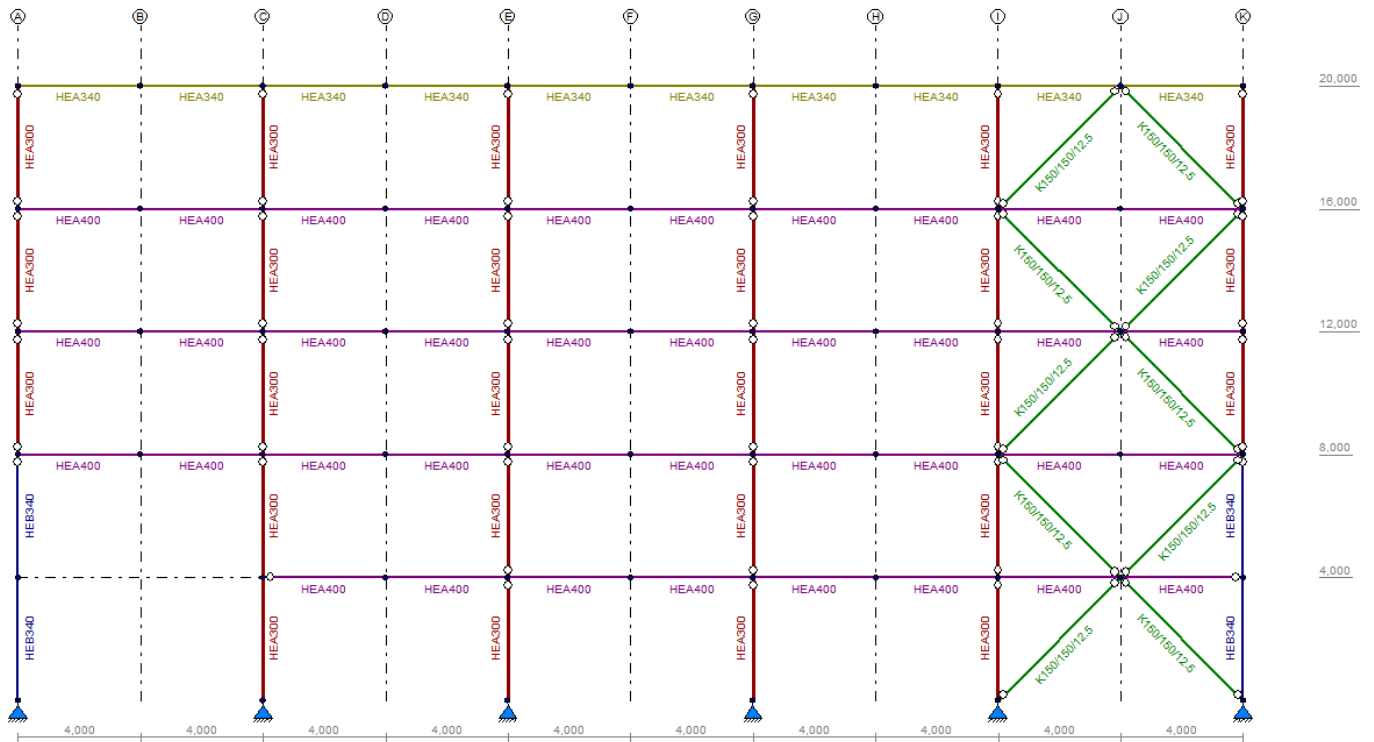


Unity check:

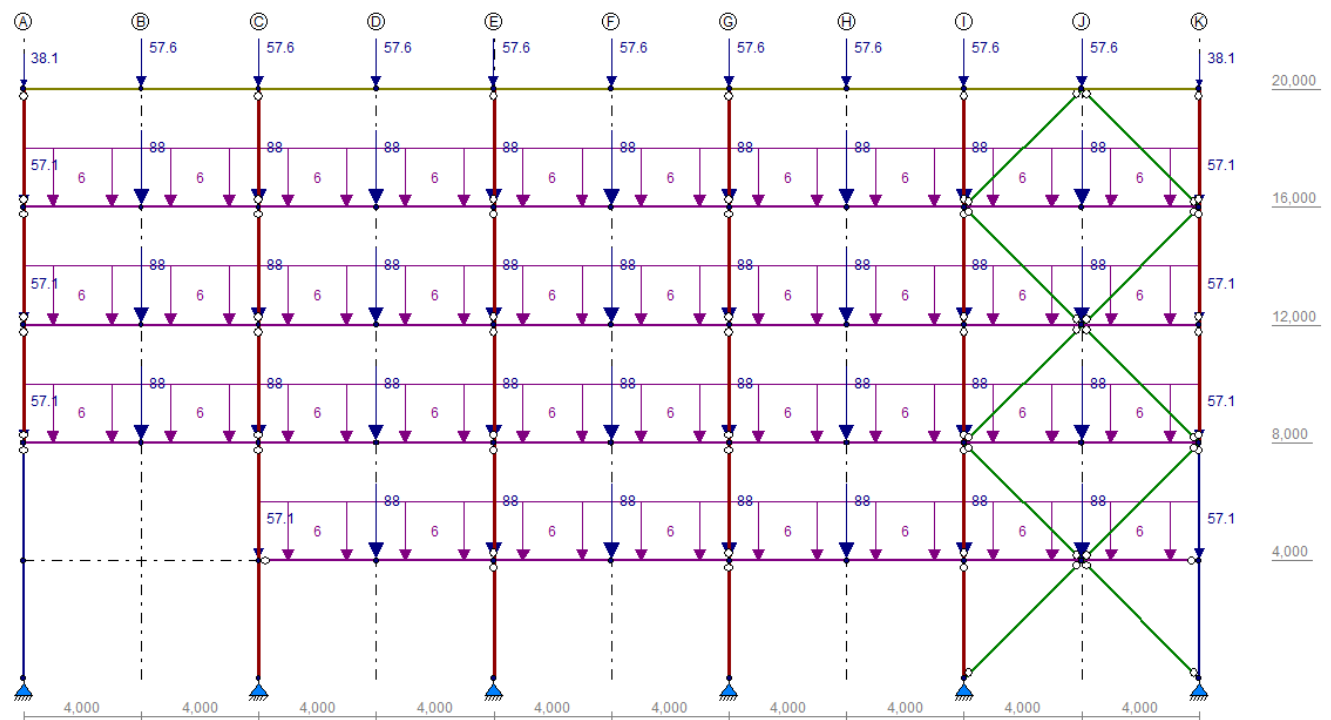


Achtergevel

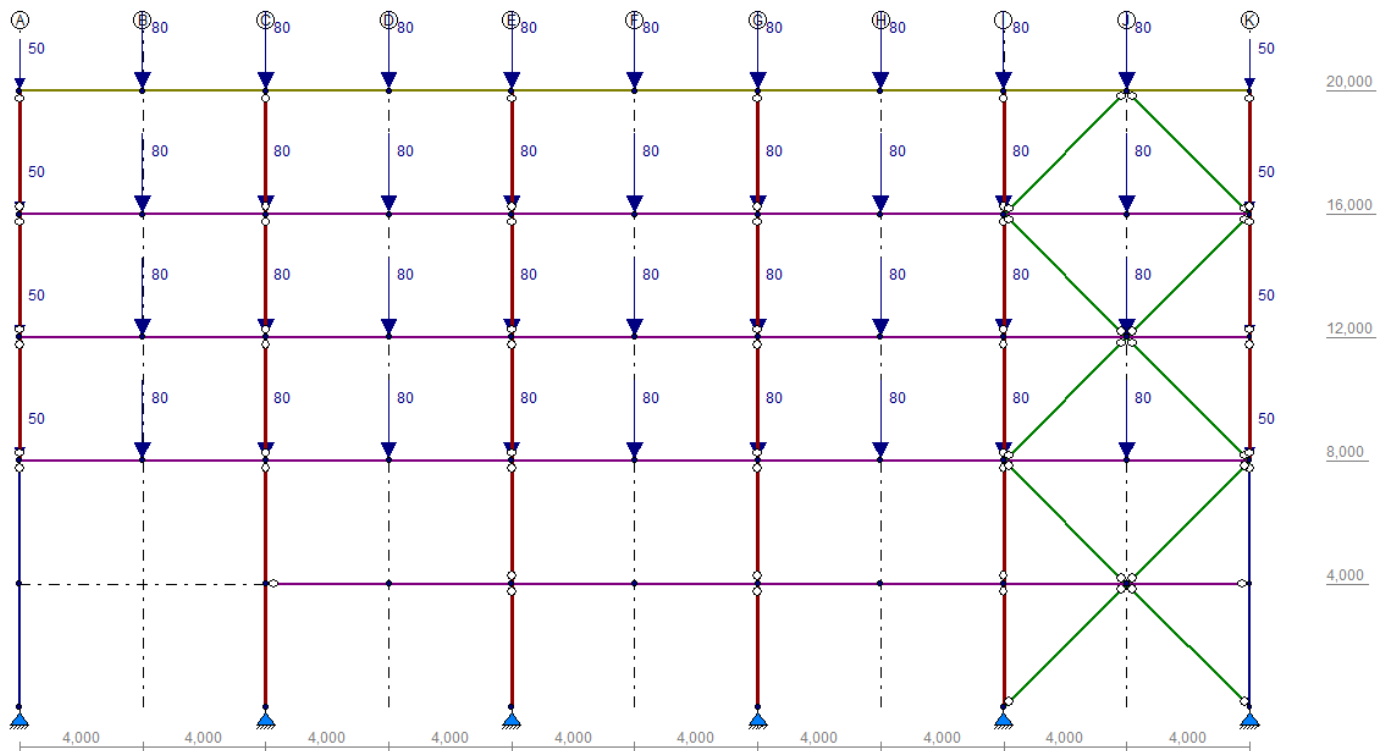
Mechanica schema:



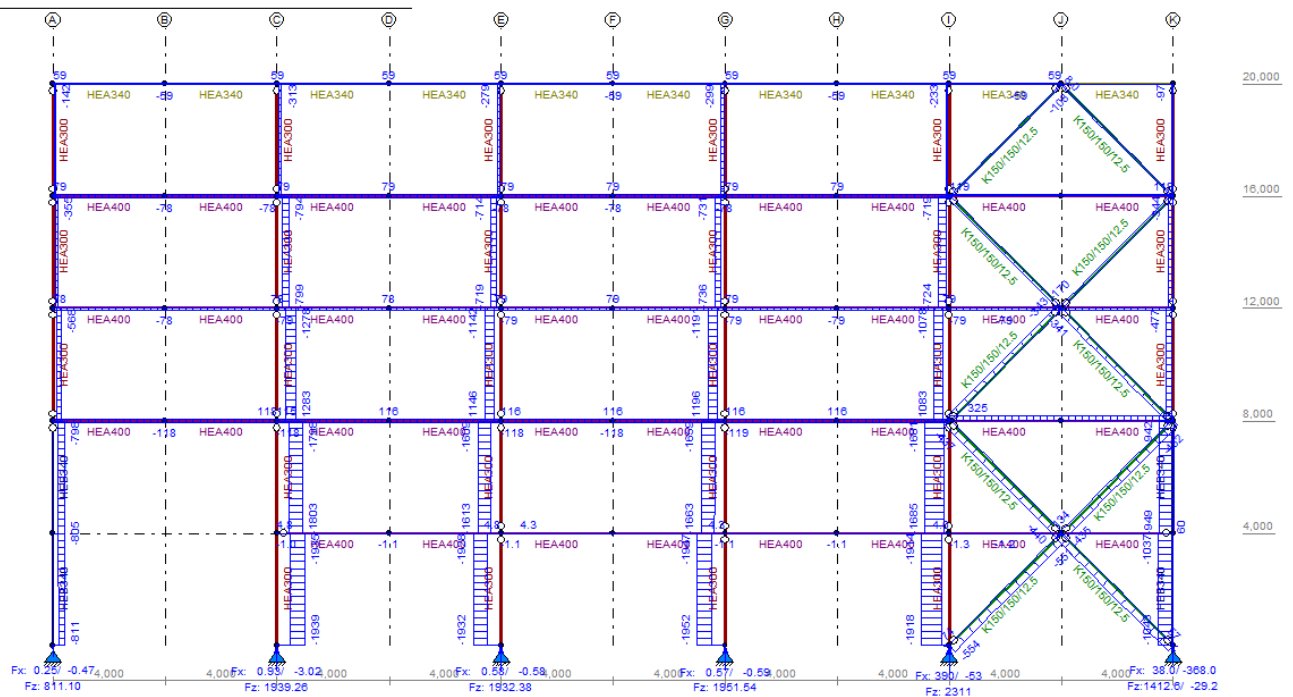
Permanente belasting:



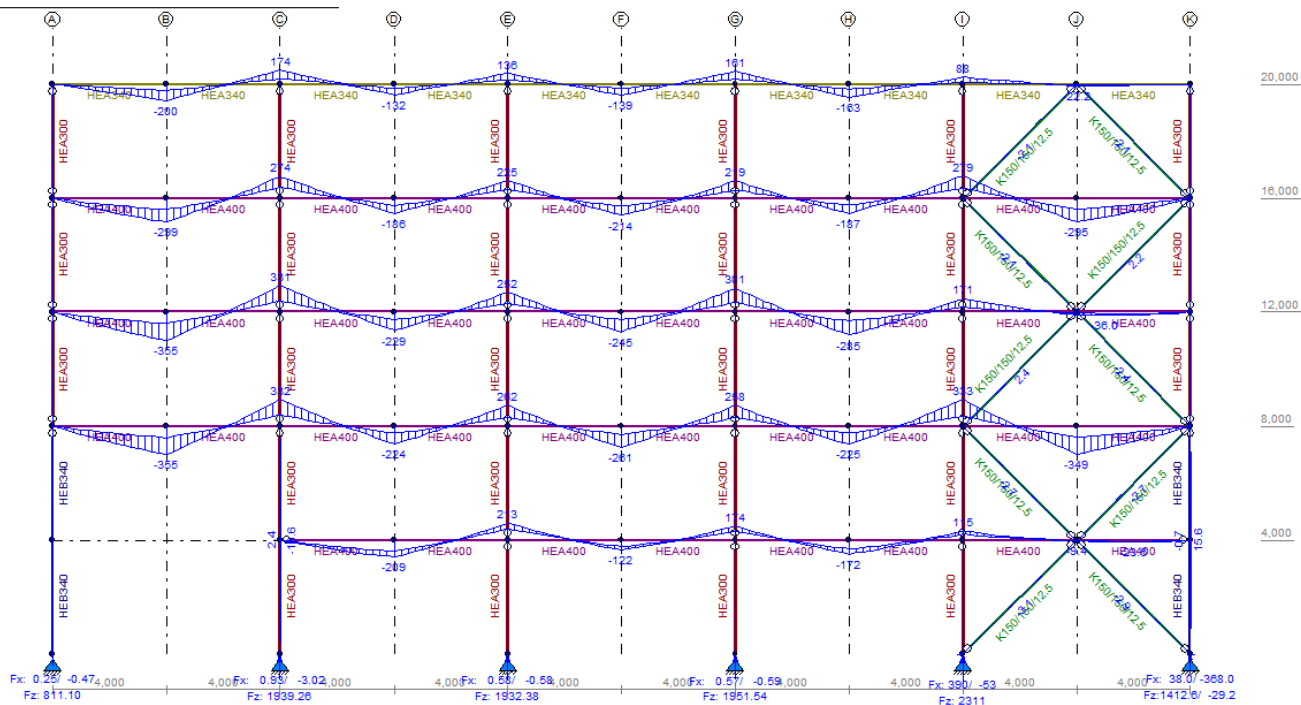
Veranderlijke belasting:



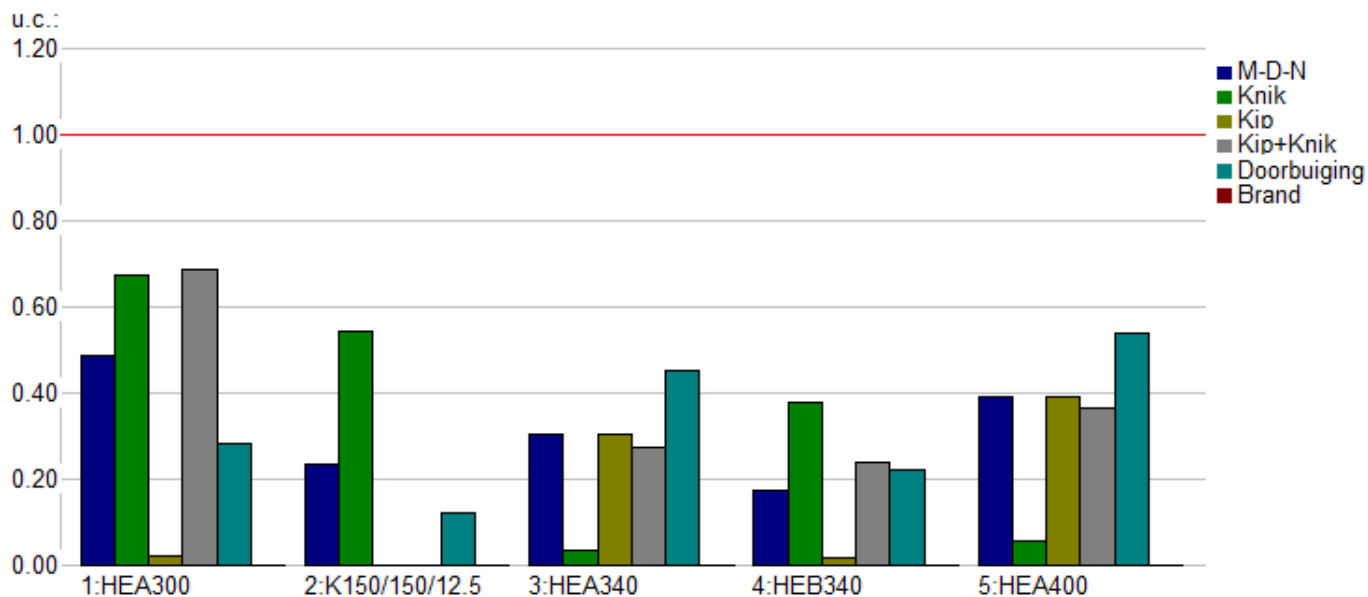
NORMAALKRACHTEN 2e orde Fundamentele combinatie



MOMENTEN 2e orde Fundamentele combinatie

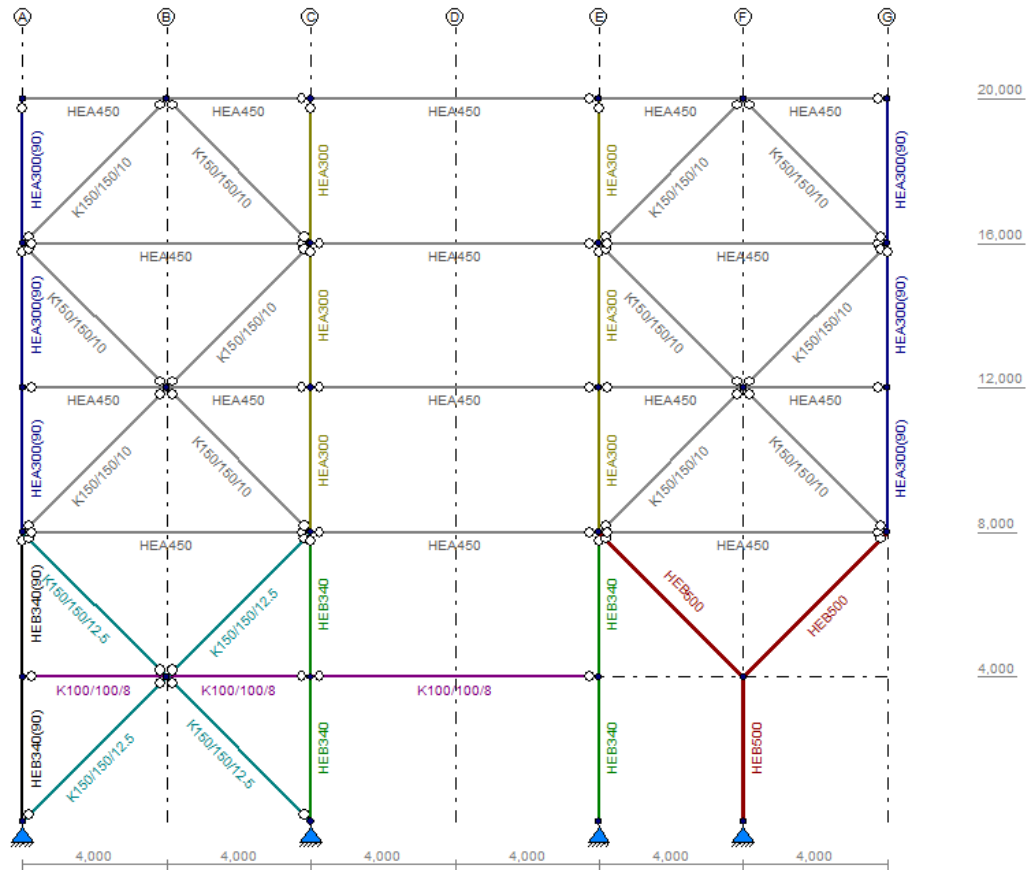


Unity check:

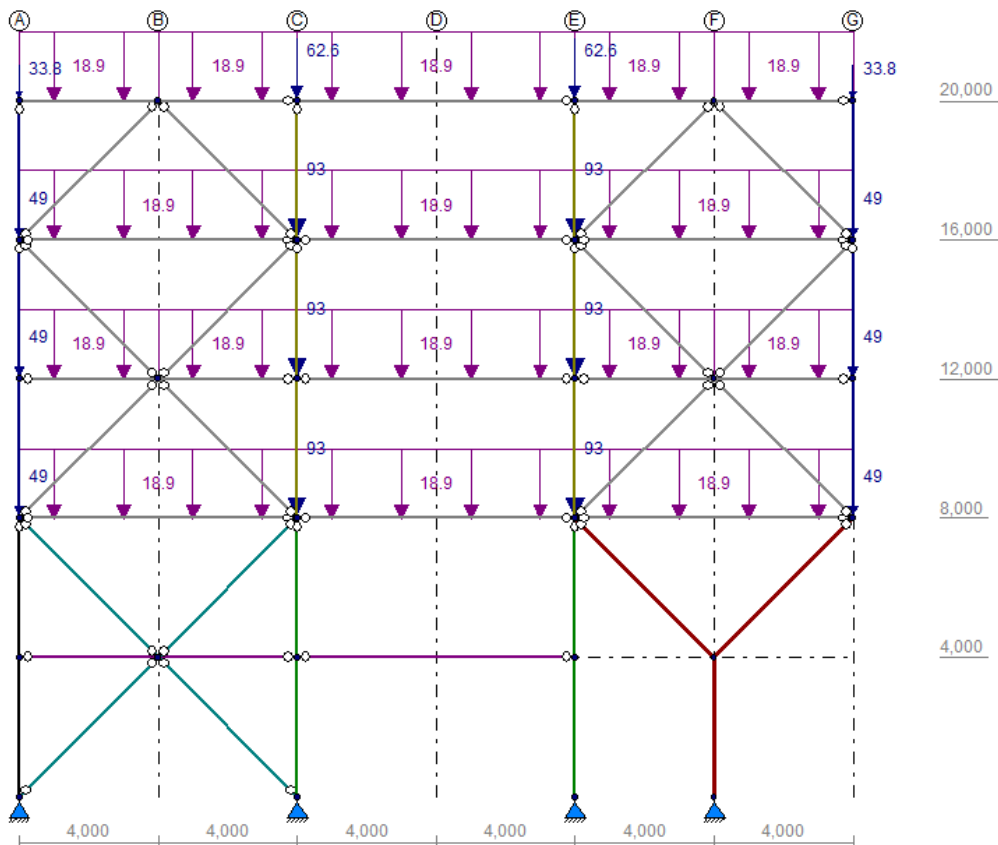


Zijgevel Links as(AK):

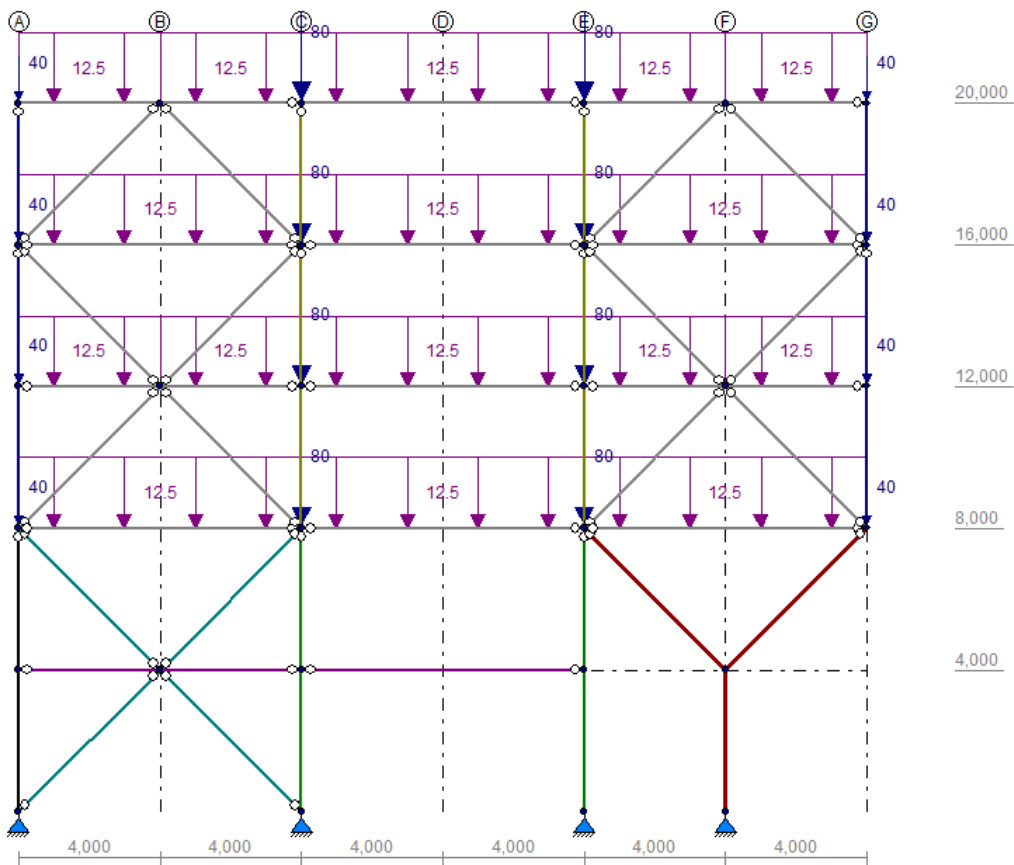
Mechanica schema:



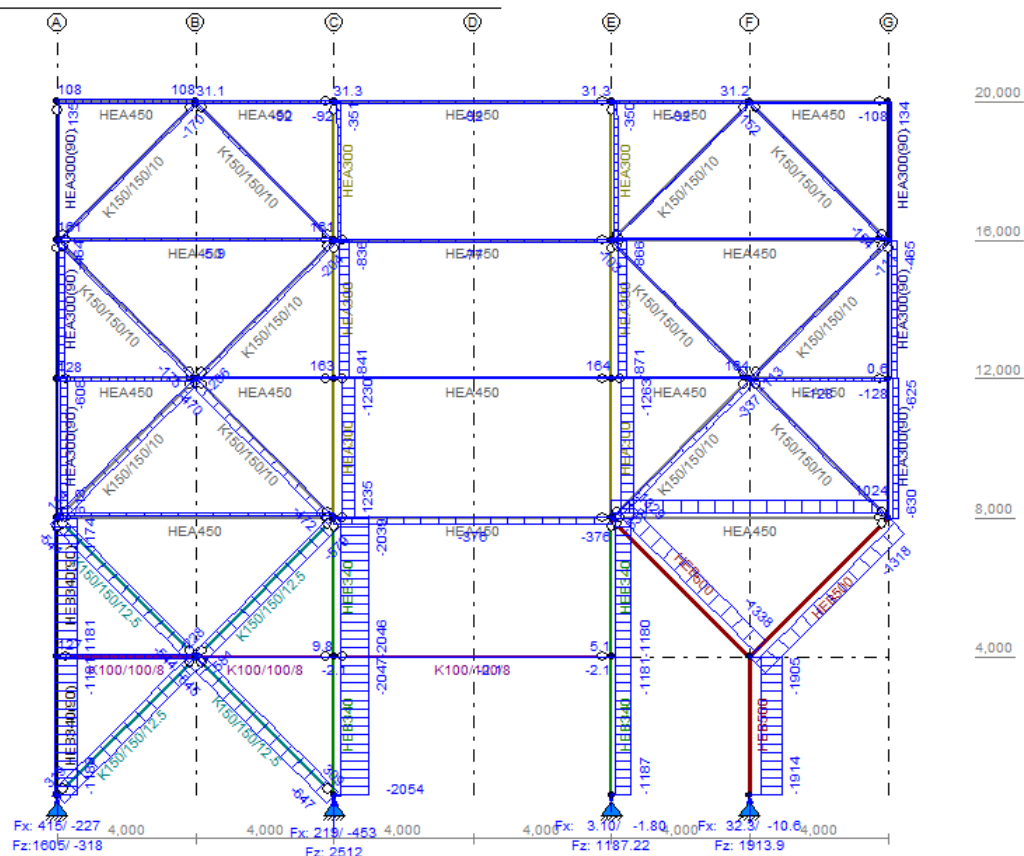
Permanente belasting:



Veranderlijke belasting:



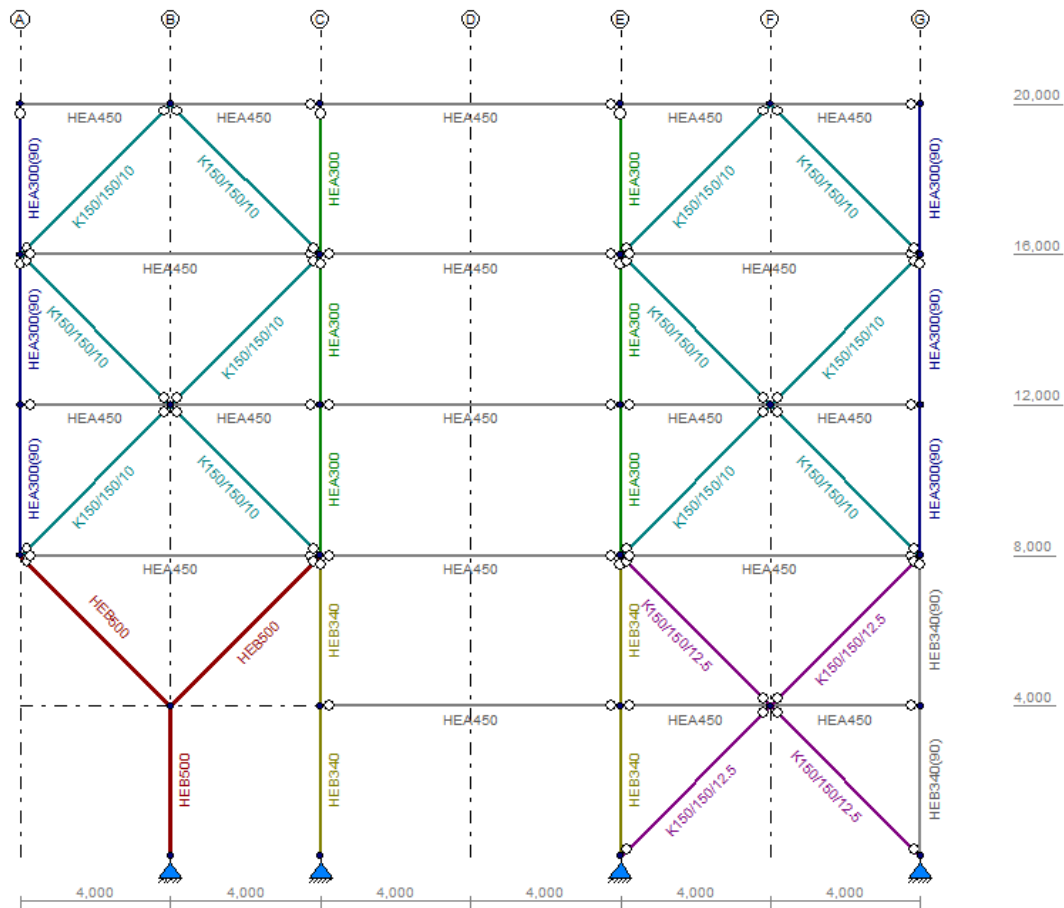
NORMAALKRACHTEN 2e orde Fundamentele combinatie



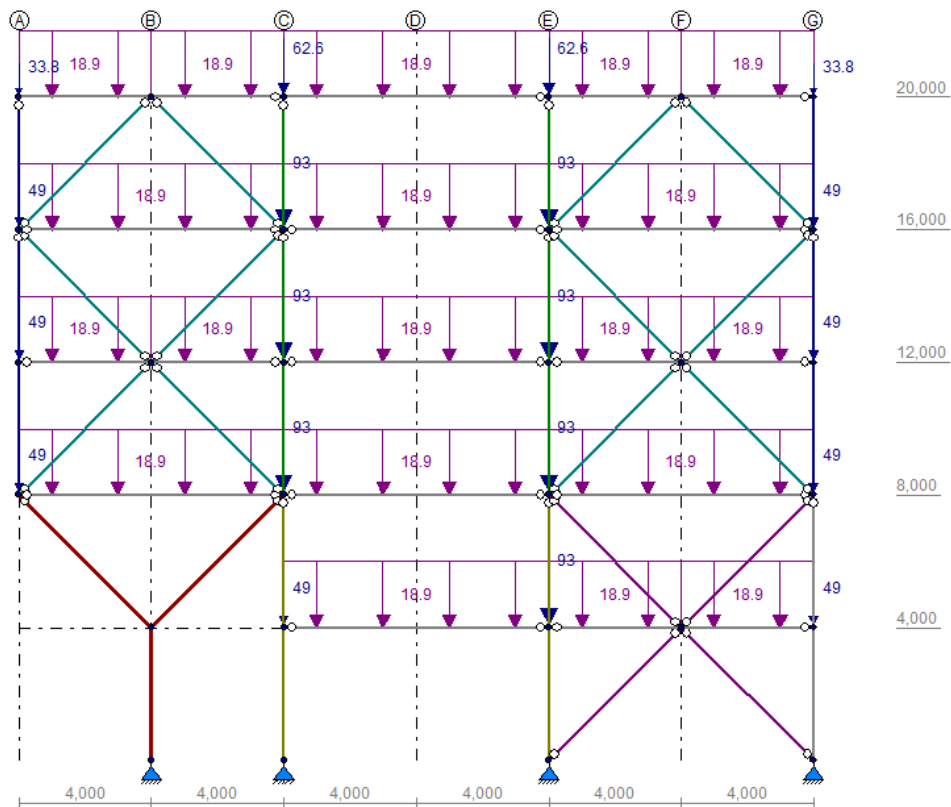
Test Case	M-D-N	Knik	Kio	Kip+Knik	Doorbuiging
1:HEB500	0.23	0.84	0.08	0.85	0.38
2:HEB340	0.34	0.46	0.01	0.47	0.10
3:HEA300	0.32	0.44	0.00	0.44	0.10
4:HEA300(90)	0.16	0.22	0.00	0.22	0.26
5:K100/100/8	0.12	0.32	0.00	0.00	0.45
6:K150/150/12.5	0.27	0.63	0.00	0.00	0.00
7:K150/150/10	0.24	0.54	0.00	0.00	0.09
8:HEA450	0.30	0.16	0.48	0.54	0.68
9:HEB340(90)	0.20	0.27	0.00	0.27	0.17

Zijgevel rechts as(BE):

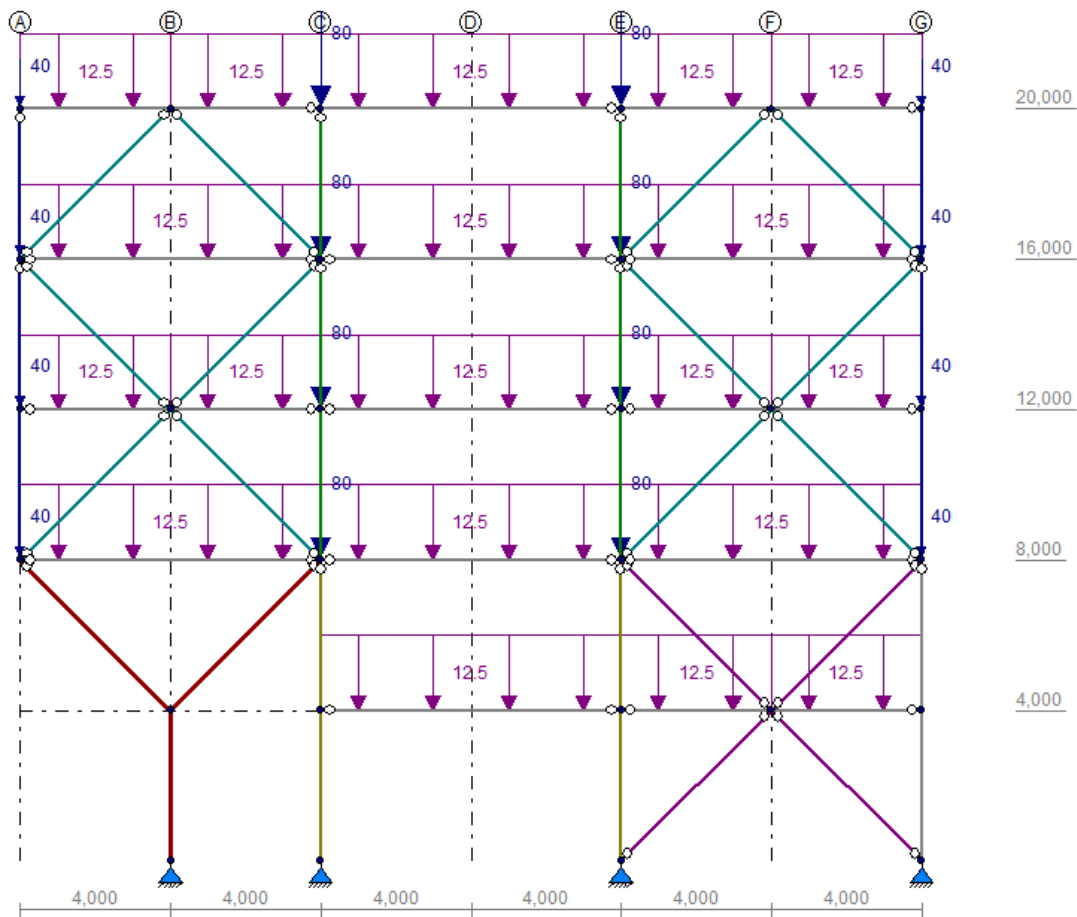
Mechanica schema:



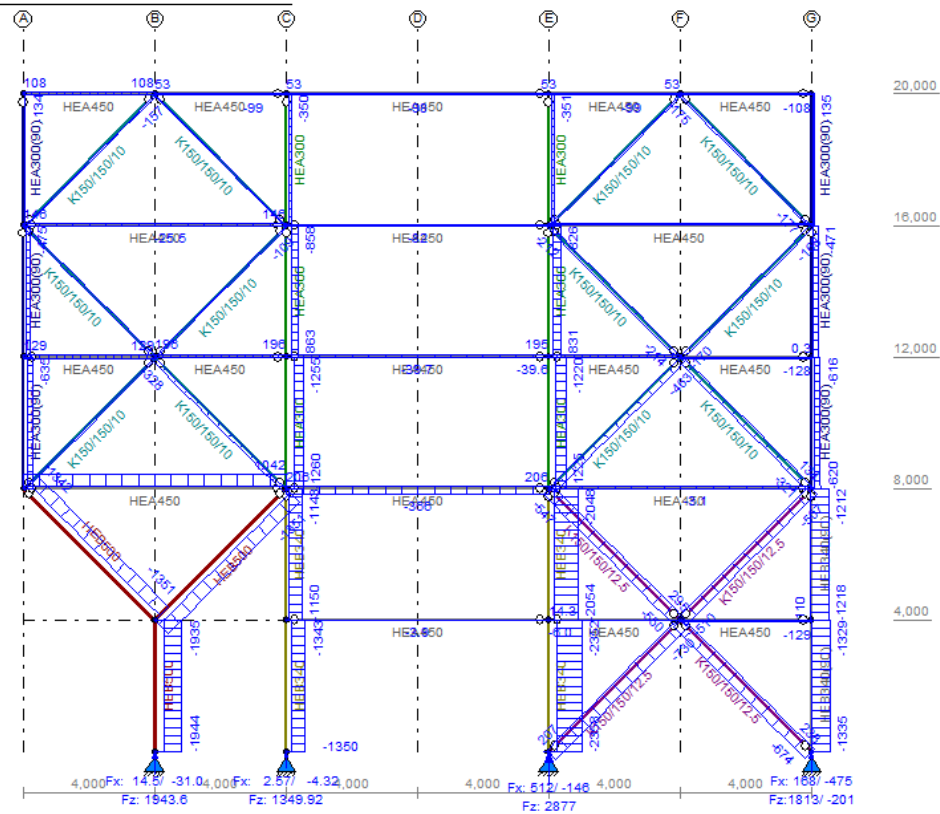
Permanente belasting:

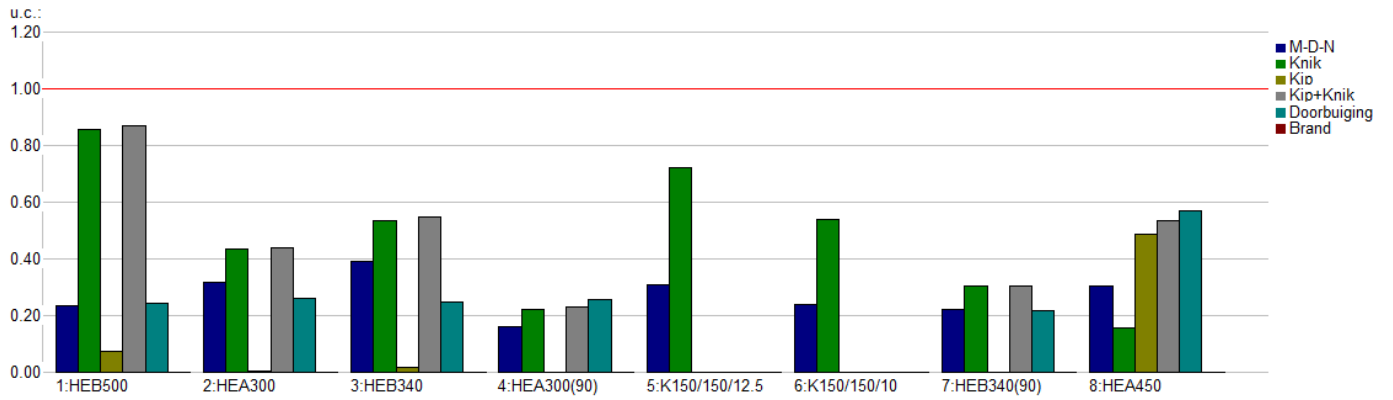
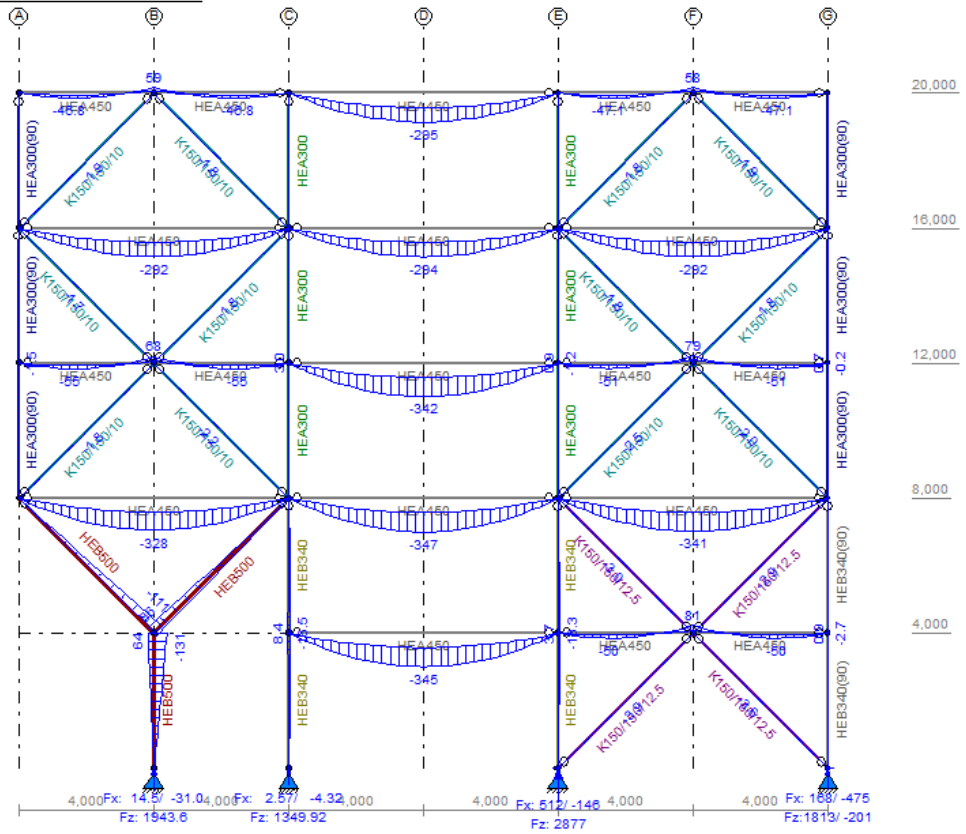


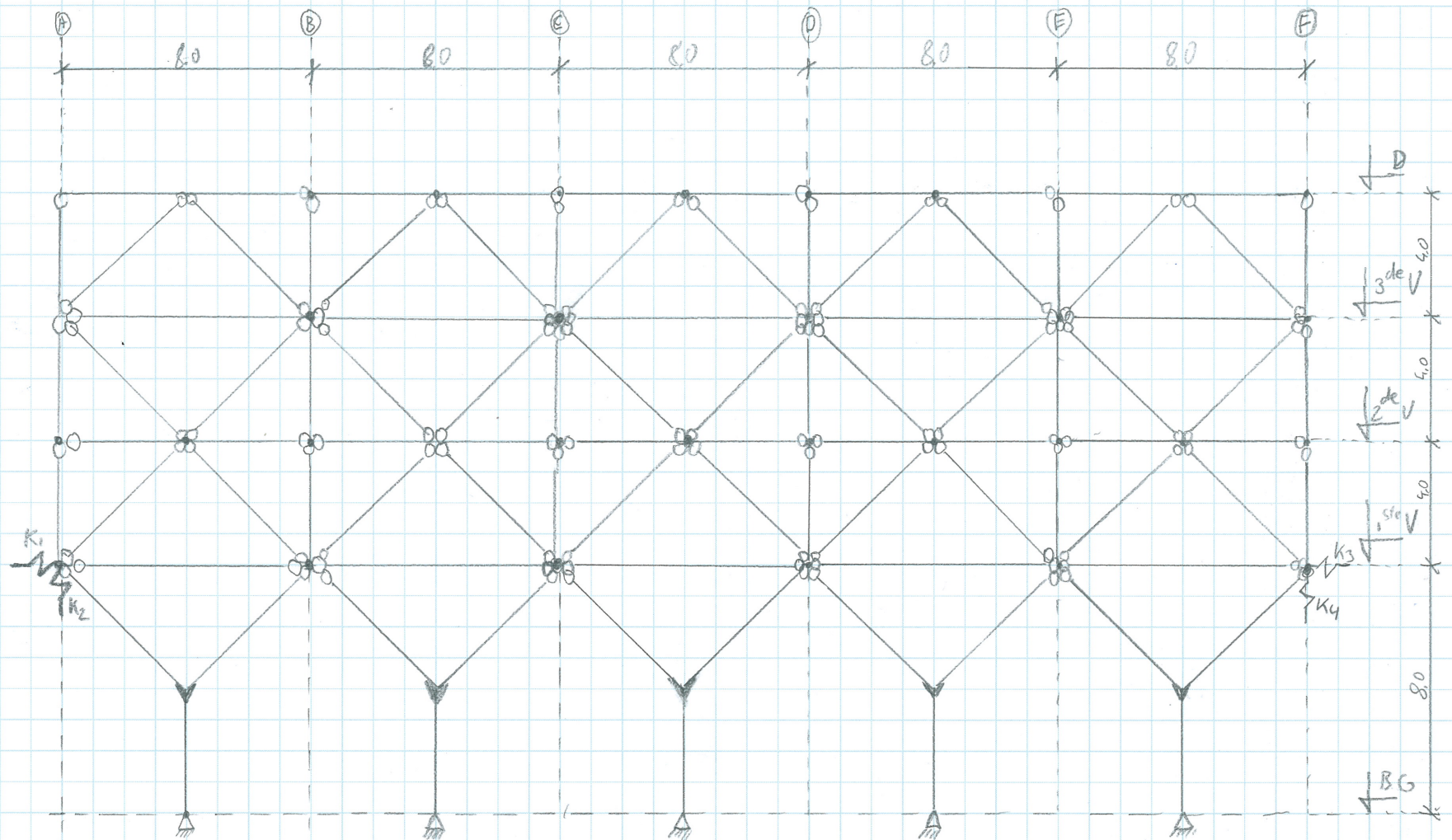
Veranderlijke belasting:



NORMAALKRACHTEN 2e orde Fundamentele combinatie



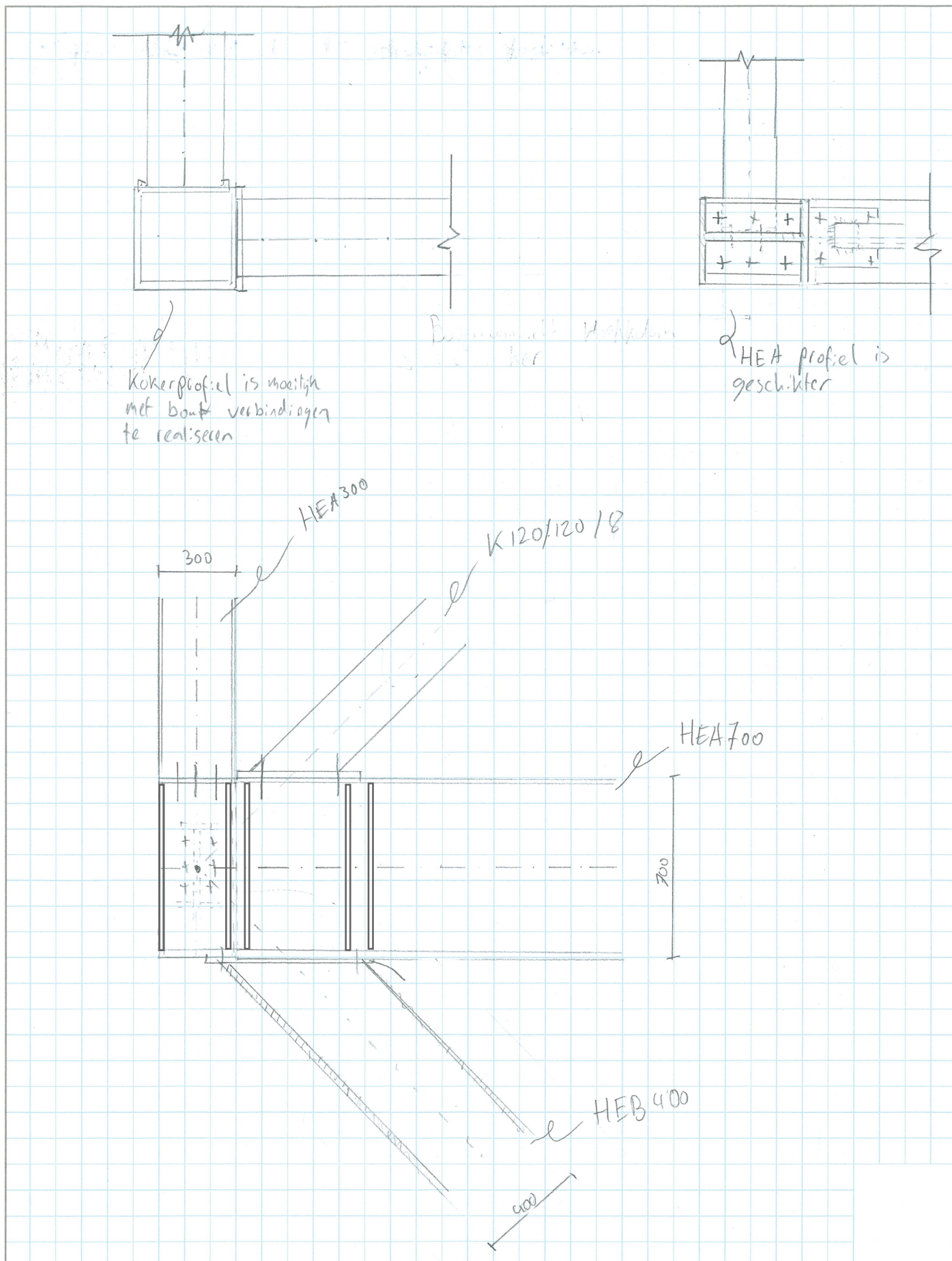




De veren komen voort uit de Y-vormige kolommen van de zijgevels, zoals berekend in hoofdstuk 6.5.3.

Variant 1 Mechanica schema

1:200

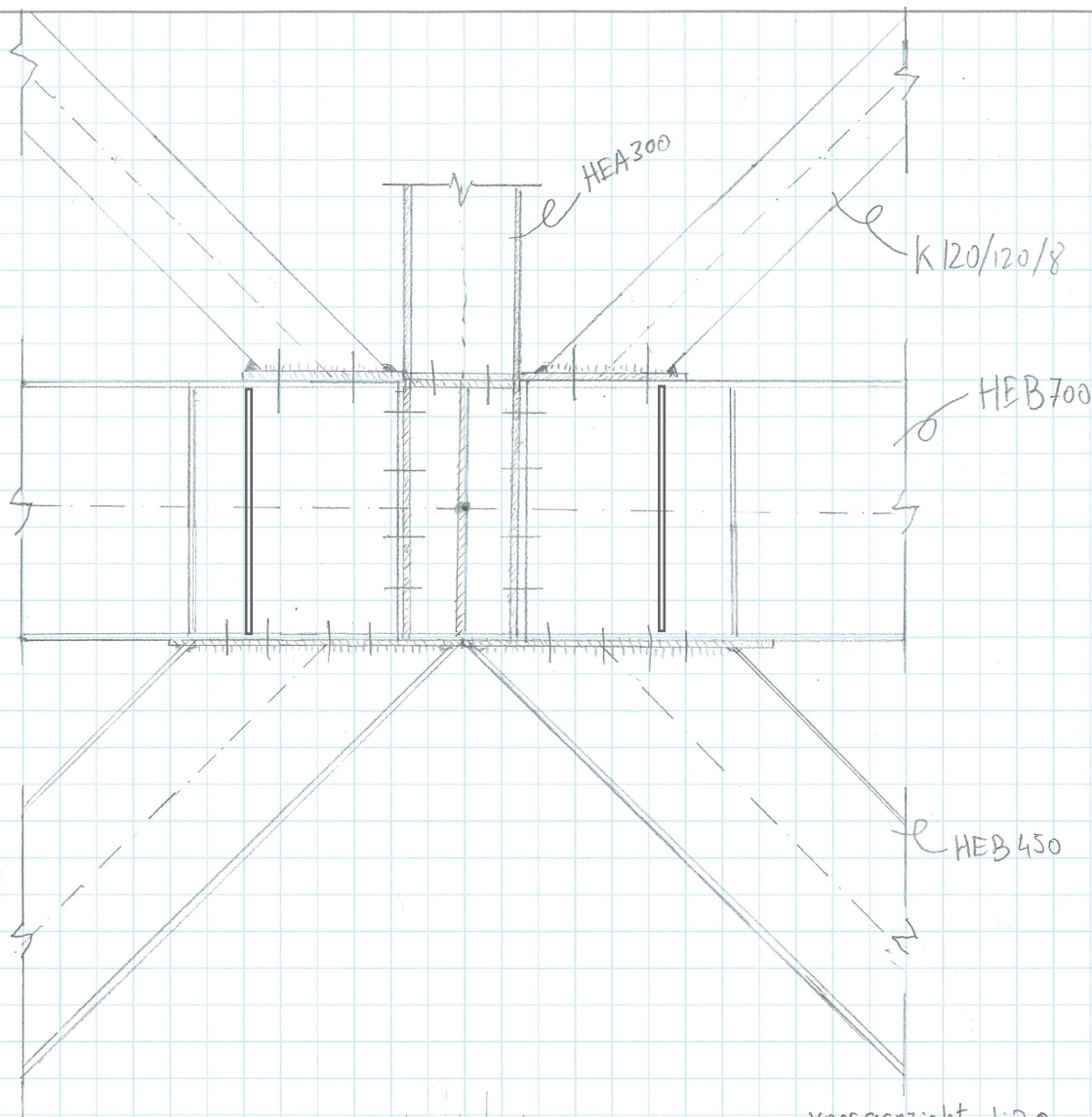


Datum:

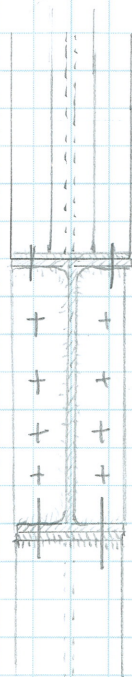
Project: Variant 1 Details

Projectnr.:

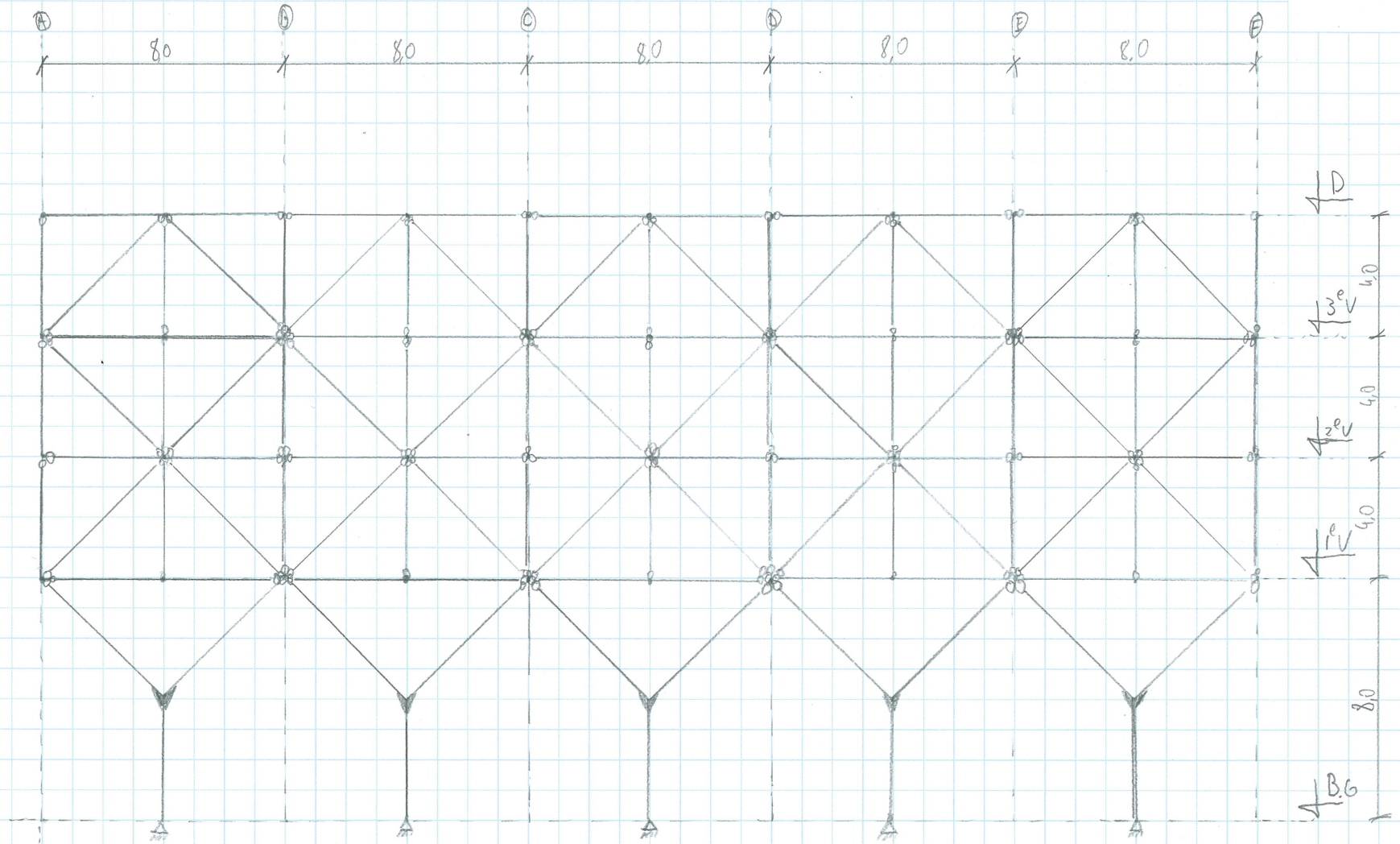
Paraaf:



vooraanzicht 1:20



Zijaanzicht 1:20

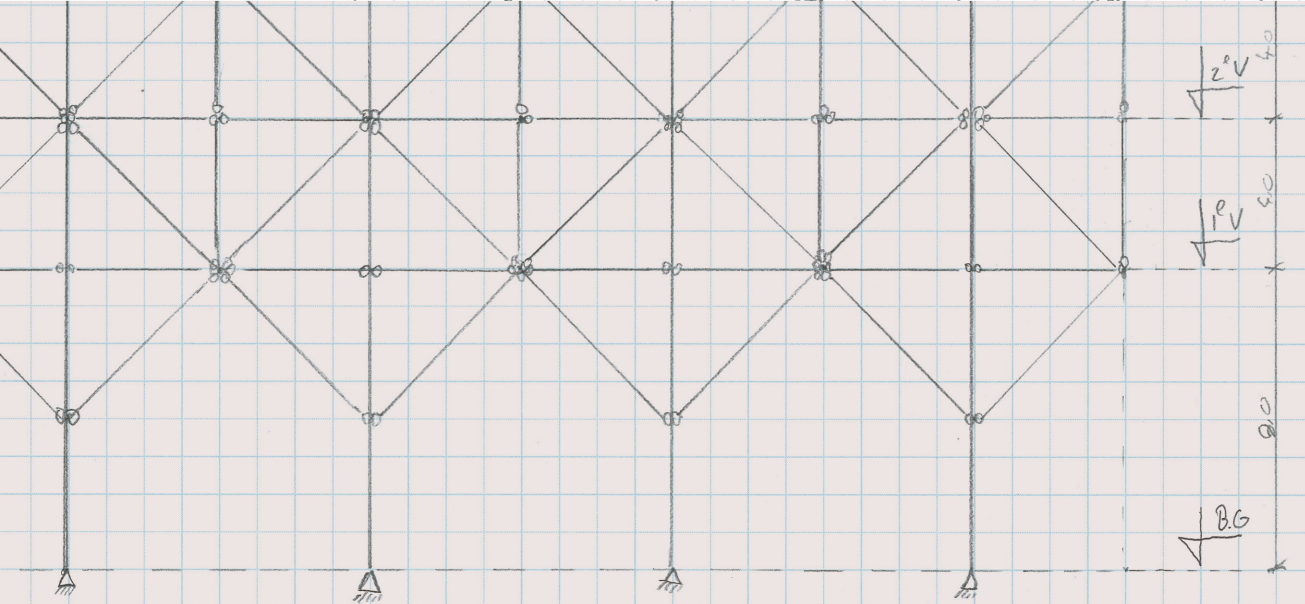
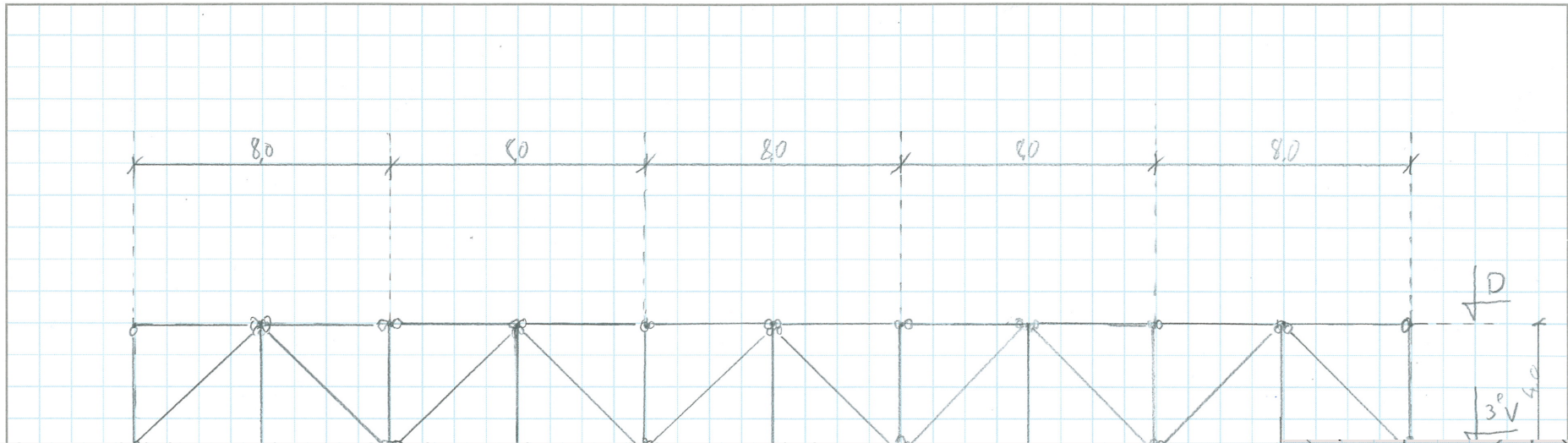


Variant 2 Mech. Schema

1:200

Paraf:

Projectnr.:



Variant 3 Mech. Schema

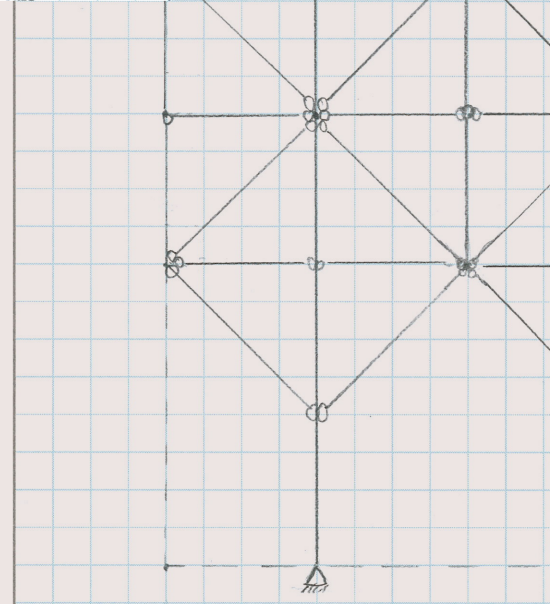
1:200

Pieters
BOUWTECHNIEK

Datum:

Project:

Variant 3



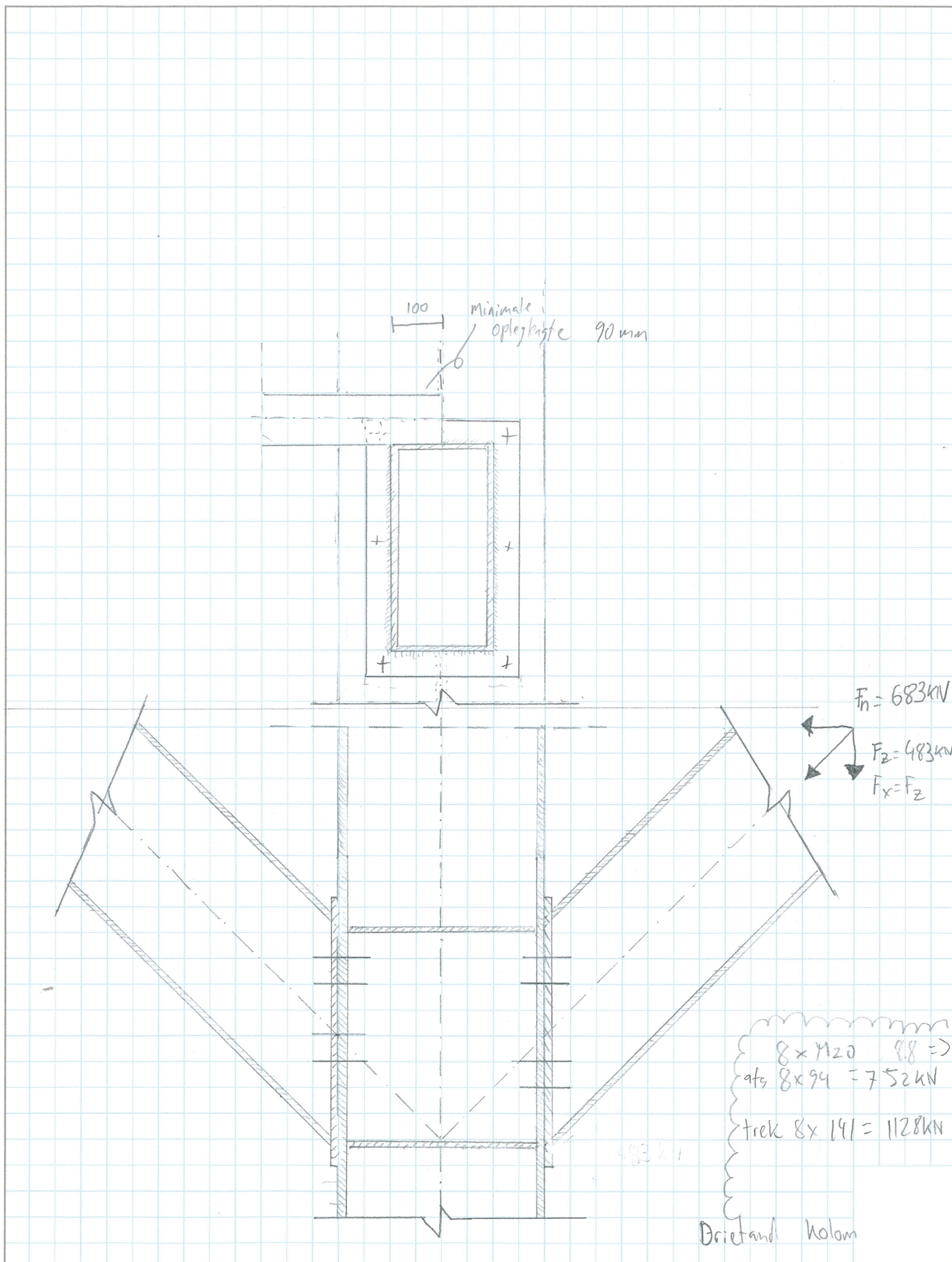
■ Datum:

■ Project:

Detail variant 3

■ Projectnr.:

■ Paraaf:

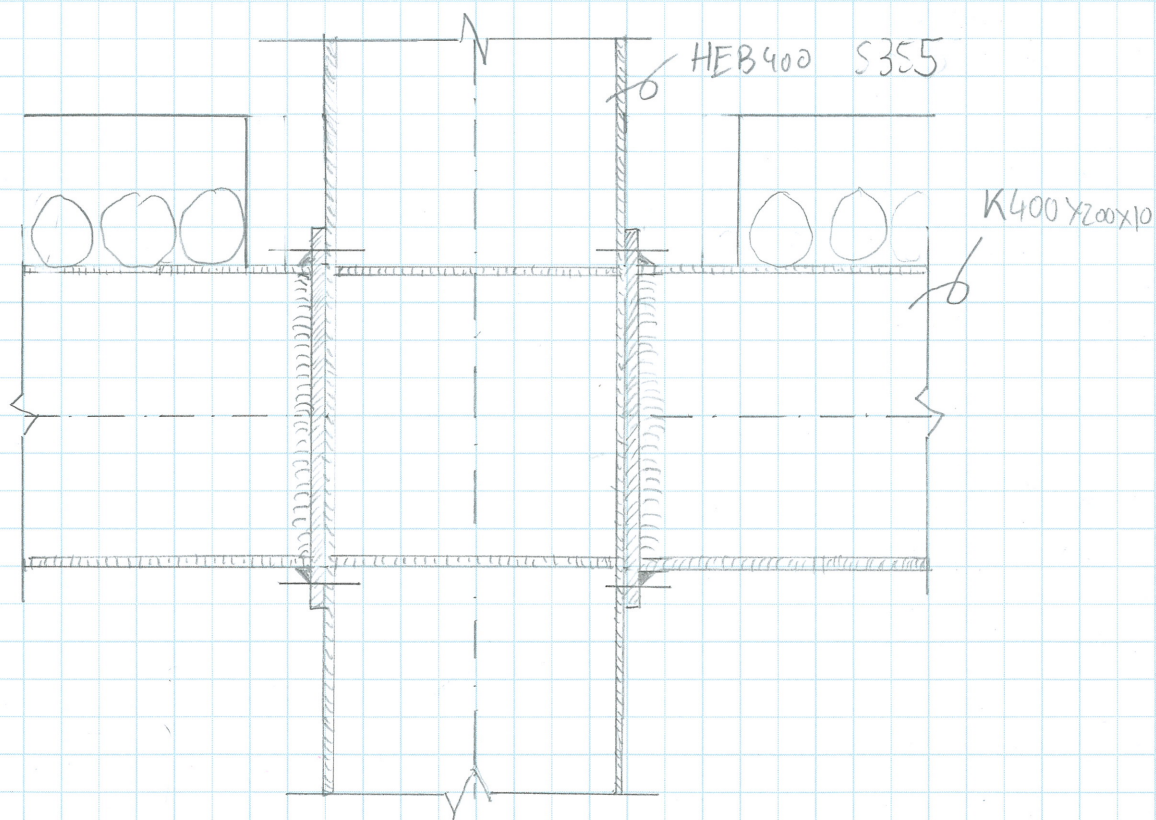


■ Datum:

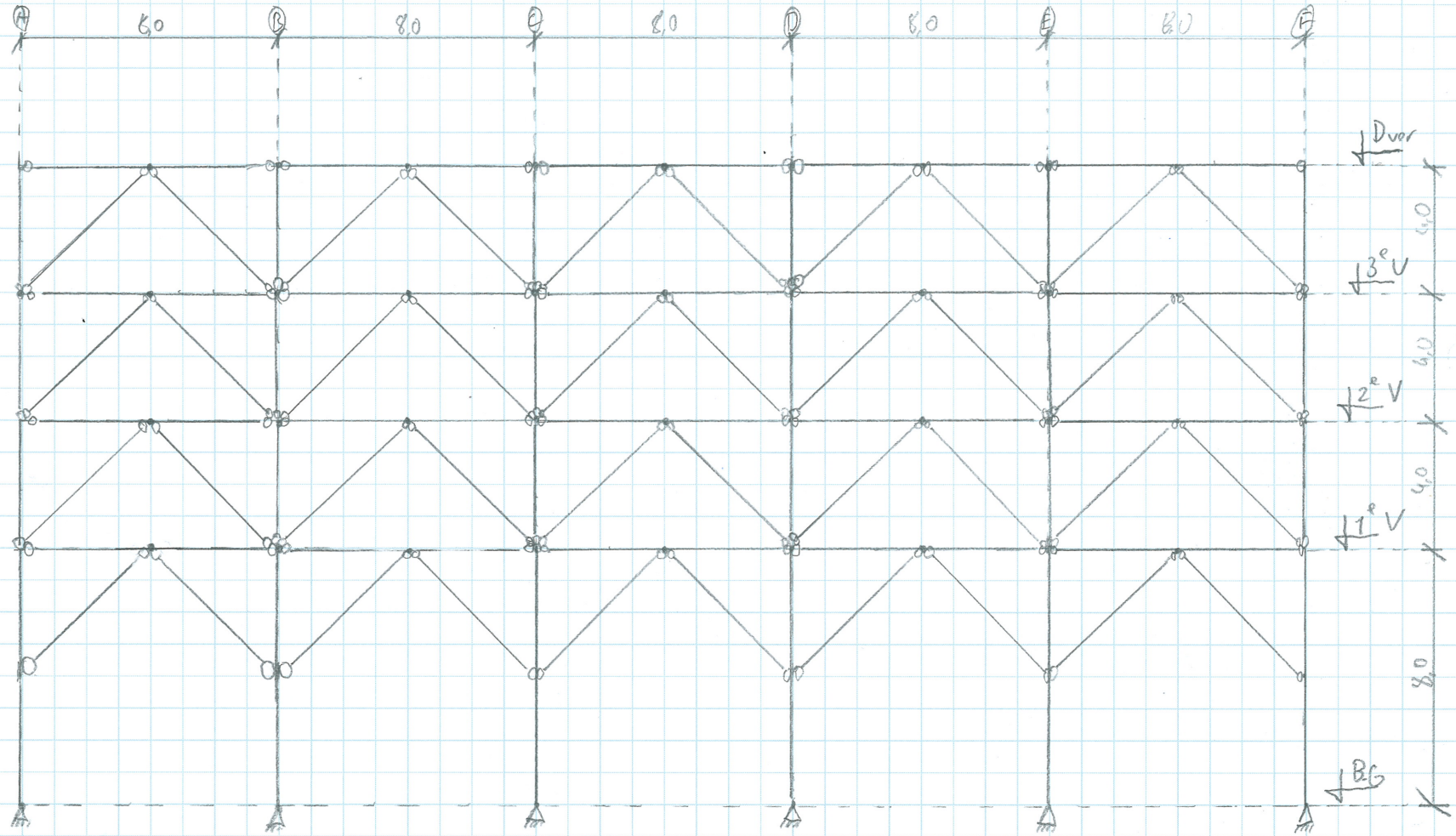
■ Project: Detailvariant 3

■ Projectnr.:

■ Paraaf:



Detail verbinding 1:10
Voor aanzicht



Variant 4 Mech. Schema

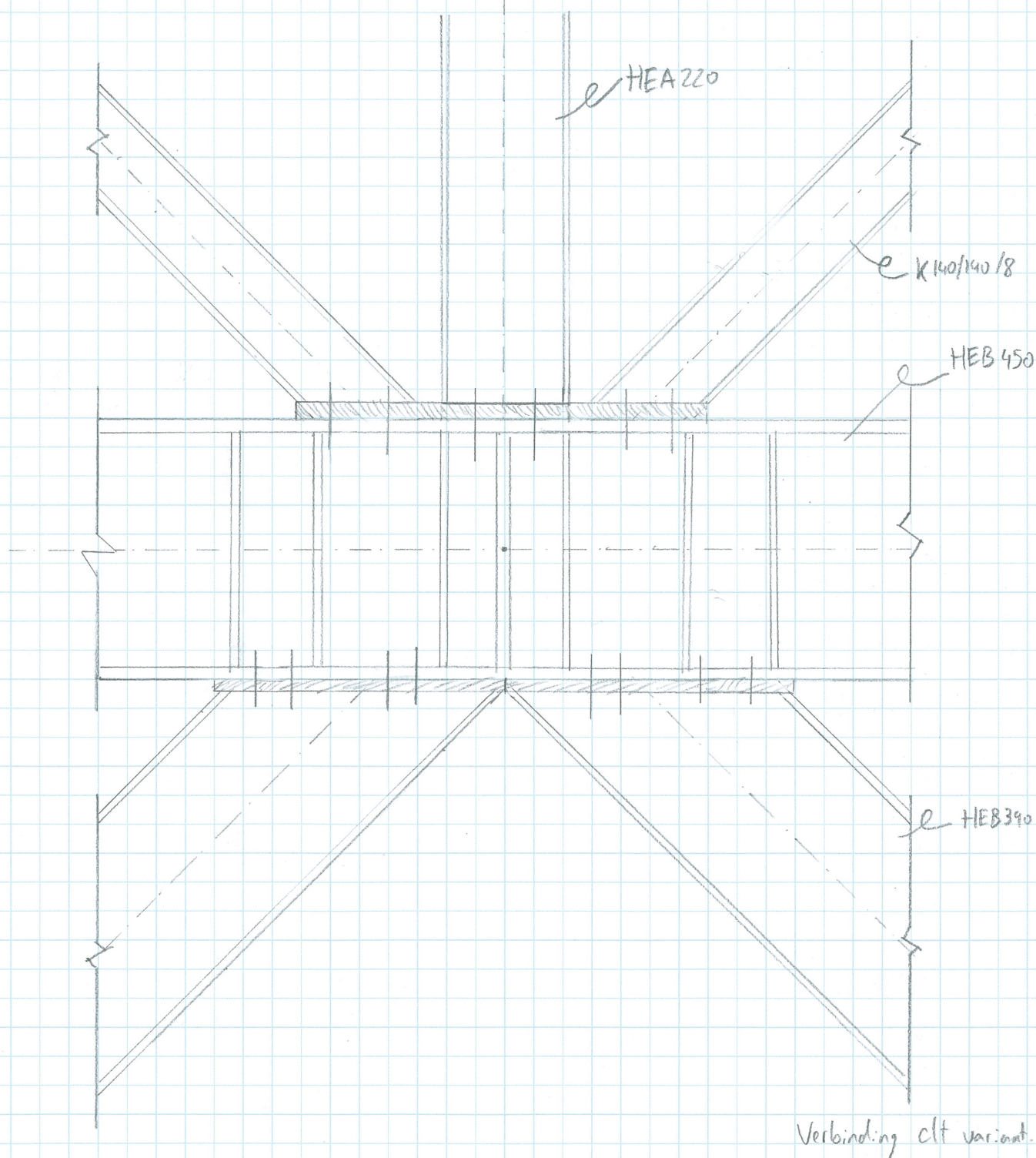
1:200

■ Datum:

■ Project: *Verbinding cft variant staal*

■ Projectnr.:

■ Paraaf:



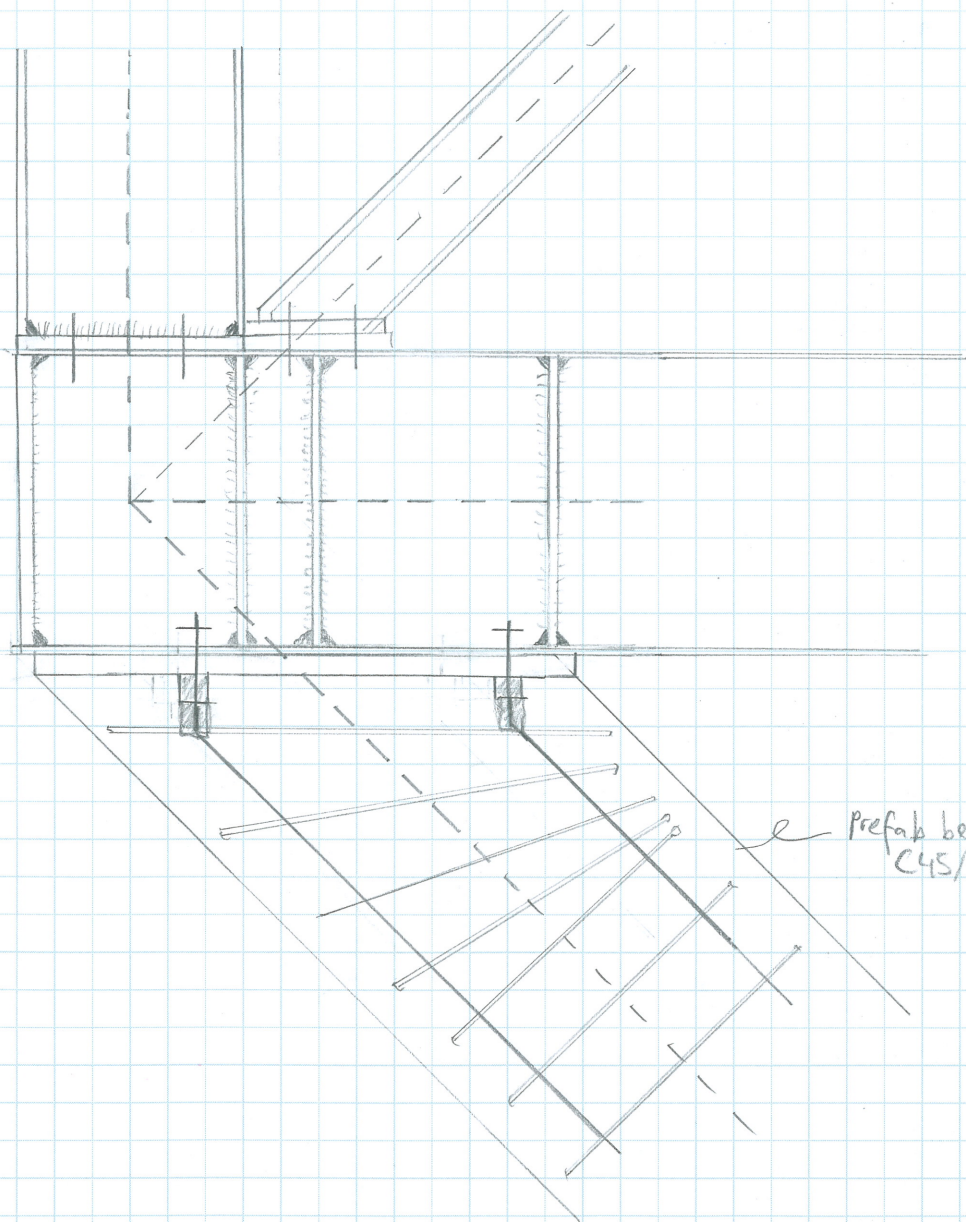
■ Datum:

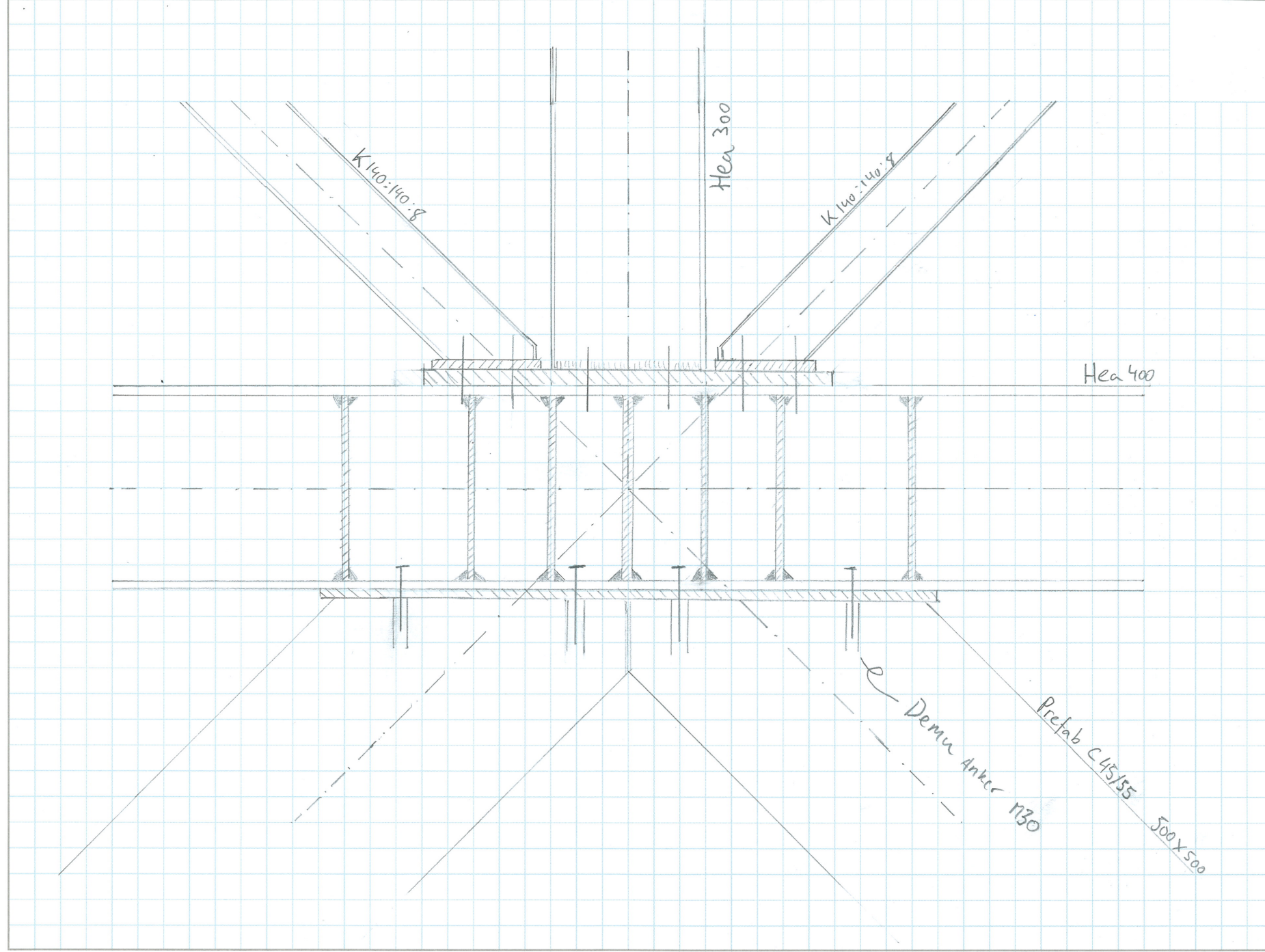
■ Project: Variant Beton

■ Projectnr.:

■ Paraaf:

Knoop verbinding uiteinde



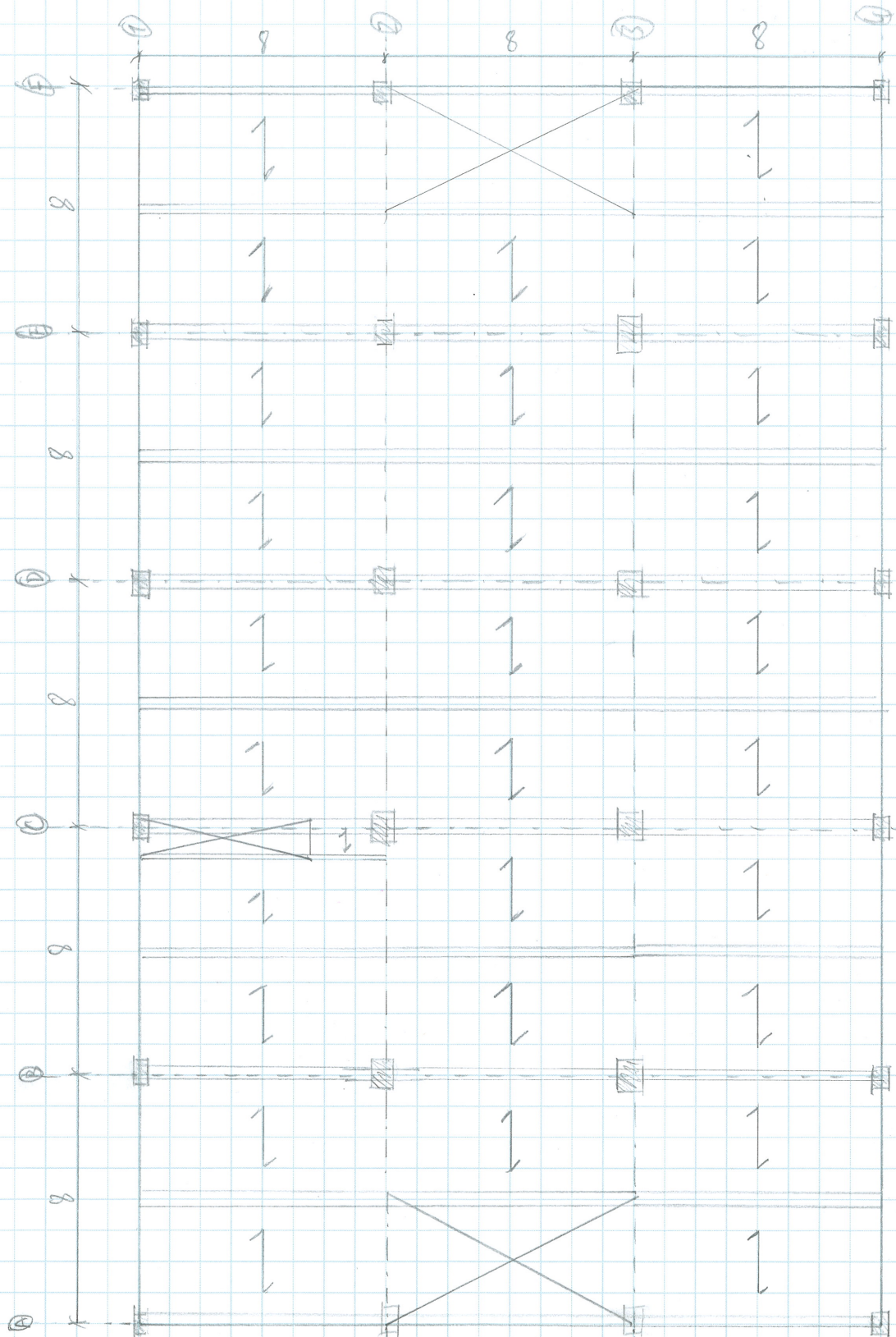


■ Datum:

■ Project: tussenliggers CLT

■ Projectnr.:

■ Paraaf:



Bovenkant vloeren onderkoning
1:200