

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen:
bouwkunde

Masterthesis

***De economische invloed van de toepassing van voorspanning met nagerekt staal op ter
plaatsse gestorte vlakke plaatvloeren in functie van een variabele overspanning en
gebruiksbelasting***

**Brecht Kemps
Lennert Versmissen**

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

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. Herve DEGEE

PROMOTOR :

Dhr. Dennis FRANCO

COPROMOTOR :

Mevr. Linde KUSTERS

BEGELEIDER :

Dhr. Erwin GORIS

Gezamenlijke opleiding UHasselt en KU Leuven



Universiteit Hasselt | Campus Diepenbeek | Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen | Agoralaan Gebouw H - Gebouw B | BE 3590 Diepenbeek

Universiteit Hasselt | Campus Diepenbeek | Agoralaan Gebouw D | BE 3590 Diepenbeek
Universiteit Hasselt | Campus Hasselt | Martelarenlaan 42 | BE 3500 Hasselt



2022
2023

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen:
bouwkunde

Masterthesis

***De economische invloed van de toepassing van voorspanning met nagerekt staal op ter
plaatsse gestorte vlakke plaatvloeren in functie van een variabele overspanning en
gebruiksbelasting***

Brecht Kempis

Lennert Versmissen

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

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. Herve DEGEE

PROMOTOR :

Dhr. Dennis FRANCO

COPROMOTOR :

Mevr. Linde KUSTERS

BEGELEIDER :

Dhr. Erwin GORIS



KU LEUVEN

Woord vooraf

Deze masterproef vormt het sluitstuk van de masteropleiding industrieel ingenieur bouwkunde. Dit onderzoek kon echter niet tot stand komen zonder de hulp van verschillende partijen en we willen hen van harte bedanken voor hun waardevolle bijdrage.

Allereerst willen we onze interne promotor prof. dr. Ir. Hervé Degée bedanken voor de begeleiding doorheen dit ganse traject. Door zijn waardevolle ervaring en kennis konden we steeds rekenen op constructieve feedback en professioneel advies.

Vervolgens uiten we graag onze dankbaarheid tegenover onze externe promotoren Erwin Goris en Dennis Franco van de firma Democo voor de kans die we kregen om dit onderzoek te mogen uitvoeren. Ook zij stonden te allen tijde klaar om ons te voorzien van extra input en praktische toepassingen over ons onderzoeksonderwerp.

Voor de ondersteuning bij het ontwerpen en dimensioneren van onze onderzoeksmodellen willen we prof. ir. Pieter Baekeland en ing. Phil Melard van harte bedanken. De extra kennis die we hebben mogen vergaren over dit topic hebben we te danken aan hun deskundigheid en zullen we zeker kunnen toepassen in onze professionele toekomst.

Verder, willen we de firma Interspan bedanken voor hun constructieve medewerking aan dit onderzoek door middel van het opmaken en dimensioneren van de modellen die werden uitgevoerd met naspanning.

Tot slot, zijn wij ook onze ouders, familie en vrienden enorm dankbaar voor hun onvoorwaardelijke steun gedurende de afgelopen studiejaren en meer specifiek dit leerrijke afstudeerproject waardoor we nu klaargestoomd zijn om volgende professionele stappen te zetten in onze toekomst als industrieel ingenieurs op de arbeidsmarkt.

Inhoudsopgave

Woord vooraf	1
Lijst van tabellen	5
Lijst van figuren	7
Abstract	9
Abstract in English	11
1. Inleiding	13
2. Literatuurstudie	15
2.1 <i>Geschiedenis</i>	15
2.2 <i>Voorspanning</i>	15
2.3 <i>Krachtwerking</i>	15
2.4 <i>Soorten voorspanning</i>	17
2.4.1 <i>Uitwendige voorspanning</i>	17
2.4.2 <i>Voorspanning met voorgerekt staal</i>	17
2.4.3 <i>Voorspanning met nagerekt staal</i>	18
2.5 <i>Naspanning in vloeren</i>	19
3. Bepaling model	23
4. Ontwerpproces – randvoorwaarden	27
4.1 <i>Ontwerplevensduur</i>	27
4.2 <i>Opgelegde belastingen</i>	27
4.3 <i>Grenstoestanden en belastingscombinaties</i>	29
4.4 <i>Materiaaleigenschappen</i>	29
4.5 <i>Brandweerstand</i>	30
4.6 <i>Betondekking</i>	32
4.7 <i>Betontype</i>	33
4.8 <i>Afmetingen kolommen</i>	34
5. Ontwerpproces – dimensionering	35
5.1 <i>Schatten van de wapening</i>	35
5.2 <i>Schatten van de plaatdikte op basis van de optimale nuttige hoogte</i>	35
5.3 <i>Pons</i>	36
5.4 <i>Spanningscontrole</i>	38
5.5 <i>Wapening</i>	38
5.6 <i>Scheurwijdtecontrole</i>	39
5.7 <i>Doorbuiging</i>	39
6. Berekening traditioneel gewapende vloerplaat	41
6.1 <i>Plaat 1</i>	41

7. Materiaalhoeveelheden	47
8. Economische vergelijking	51
8.1 <i>Kostprijs platen op basis van actuele materiaalprijzen</i>	51
8.2 <i>Evolutie prijzen</i>	53
8.3 <i>Kostprijs platen op basis van materiaalprijzen uit 2018</i>	54
9. Externe factoren die keuze voor vloerplaat met naspanning beïnvloeden	57
9.1 <i>Materiaalprijzen</i>	57
9.1.1 <i>Stijging van de betonprijs met 20%</i>	57
9.1.2 <i>Daling van de betonprijs met 20%</i>	58
9.1.3 <i>Stijging van de wapeningsprijs en PT prijs met 20%</i>	59
9.1.4 <i>Daling van de wapeningsprijs en PT prijs met 20%</i>	60
9.2 <i>Bekisting</i>	61
9.3 <i>Duurzaamheid</i>	63
9.4 <i>Brandweerstand</i>	65
9.5 <i>Andere randvoorwaarden</i>	65
10. Conclusie	67
Bibliografie	69
Bijlagen	71

Lijst van tabellen

Tabel 1: Plaat eigenschappen.....	23
Tabel 2: Indicatieve ontwerp levensduren.....	27
Tabel 3: Bouwmaterialen - Beton en mortel [12]	28
Tabel 4: Opgelegde belastingen voor gebouwen [13]	28
Tabel 5: Formules van de rekenwaardes van beton en staal met hun respectievelijk hun veiligheidsfactoren	30
Tabel 6: Rekenwaardes van beton en staal voor C30/37	30
Tabel 7: Minimale kolomafmetingen en asafstanden voor kolommen met rechthoekige of ronde doorsnede [10]	31
Tabel 8: Minimale afmetingen en asafstanden voor vrij opgelegde of doorgaande massieve gewapende betonplaten	31
Tabel 9: Nominale betondekking in functie van de milieuklassen.....	33
Tabel 10: Overzicht C_{nom} bij verschillende overspanningen.....	33
Tabel 11: Betonsterkteklassen en -eigenschappen [10]	33
Tabel 12: Kolomafmetingen (mm)	34
Tabel 13: Controle spanningen kolommen	34
Tabel 14: Basislankheden voor gewapend betonnen elementen zonder normaal druk	35
Tabel 15: Aanbevolen waarden W_{max} (mm) [17].....	39
Tabel 16: Hoeveelheden RC per type plaat.....	47
Tabel 17: Hoeveelheden PT per type plaat	47
Tabel 18: Hoeveelheden en kostprijzen actuele situatie	51
Tabel 19: Kostprijs bekisting.....	62
Tabel 20: Kostprijs doorstempeling.....	63
Tabel 21: Totaalprijs beton, bekisting en doorstempeling.....	63
Tabel 22: Externe factoren die keuze voor vloeren met naspanning beïnvloeden	66

Lijst van figuren

Figuur 1: Spanningen in de doorsnede van een balk ten gevolge van een opgelegde belasting in combinatie met naspanning [3]	16
Figuur 2: Principe van voorspanning met voorgerekt staal [5]	17
Figuur 3: Maximaal haalbare overspanning voor traditioneel gewapende platen en platen met naspanning [3].....	21
Figuur 4: Gunstige en ongunstige lay-outs voor dragende wanden [7].....	22
Figuur 5: Invloed van randvelden op de momenten in het middenveld (SCIA)	24
Figuur 6: 3D-ervormingen van de plaat.....	25
Figuur 7: Momenten in x-richting zonder middelingsstrook.....	25
Figuur 8: Momenten in x-richting met middelingsstrook	25
Figuur 9: Nominale betondekking [16].....	32
Figuur 10: Ponskracht.....	37
Figuur 11: Eerste ponscontrole	37
Figuur 12: Tweede ponscontrole.....	37
Figuur 13: Plaathoogte in functie van de overspanning voor platen met een VB van 3 kN/m ²	48
Figuur 14: Plaathoogte in functie van de overspanning voor platen met een VB van 5 kN/m ²	48
Figuur 15: Hoeveelheid wapening in functie van de overspanning voor platen met een VB van 3 kN/m ²	48
Figuur 16: Hoeveelheid wapening in functie van de overspanning voor platen met een VB van 5 kN/m ²	48
Figuur 17: Excentriciteit van de naspanstrengen t.o.v. onderkant vloerplaat bij een plaat met een overspanning van 5 m	49
Figuur 18: Excentriciteit van de naspanstrengen t.o.v. onderkant vloerplaat bij een plaat met een overspanning van 7 m	49
Figuur 19: Kostprijs vloer a.d.h.v. actuele prijzen 2023 (VB 3 kN/m ²)	52
Figuur 20: Kostprijs vloer a.d.h.v. actuele prijzen 2023 (VB 5 kN/ m ²)	52
Figuur 21: Evolutie betonprijzen	53
Figuur 22: Evolutie wapeningsprijs	54
Figuur 23: Kostprijs van de platen a.d.h.v. materiaalprijzen van 2018 (VB 3 kN/m ²)	54
Figuur 24: Prijzen 2018 (VB 5 kN/m ²).....	55
Figuur 25: Betonprijzen +20% (VB 3 kN/m ²)	57
Figuur 26: Betonprijzen +20% (VB 5 kN/m ²)	58
Figuur 27: Betonprijzen -20% (VB 3 kN/ m ²)	58
Figuur 28: Betonprijzen -20% (VB 5 kN/ m ²)	59
Figuur 29: Wapeningsprijs en PT prijs +20% (VB 3 kN/ m ²)	59
Figuur 30: Wapeningsprijs en PT prijs +20% (VB 5 kN/ m ²)	60
Figuur 31: Wapeningsprijs en PT prijs -20% (VB 3 kN/m ²)	60
Figuur 32: Wapeningsprijs en PT prijs -20% (VB 5 kN/ m ²)	61
Figuur 33: Global greenhouse gas emissions by industry (2014) [18]	64

Abstract

De bouwtechniek van voorspanning met nagerekt staal, of naspanning, wordt al frequent toegepast in onder andere bruggenbouw, maar is minder gebruikelijk in residentiële bouwkunde, waardoor er een gebrek aan kennis is over deze techniek in vloerconstructies. Deze masterproef focust op de economische haalbaarheid van naspanning in gestorte vloerelementen, waarbij overspanning en belasting als variërende parameters worden beschouwd.

Twaalf verschillende modellen, bestaande uit vlakke plaatvloeren, ondersteund door kolommen met indien nodig lokale verdikkingen, worden gedimensioneerd. Zes van deze modellen worden berekend volgens de traditionele gewapende methode, terwijl de overige zes modellen worden berekend volgens de methode van naspanning. Voor alle modellen worden verschillende parameters, die betrekking hebben op de lokale verdikkingen, vastgelegd.

Uit de resultaten blijkt dat naspanning in vloeren voordelig kan zijn bij overspanningen vanaf 6,8 m bij een variabele belasting van 3 kN/m² en vanaf 5,8 m bij een variabele belasting van 5 kN/m².

Het is belangrijk op te merken dat deze bevindingen dynamisch zijn en de keuze voor een nagespannen vloer kan worden beïnvloed door verschillende externe factoren.

Concluderend, biedt deze masterproef waardevolle inzichten in de economische haalbaarheid van naspanning in gewapende vloerelementen en draagt daarmee bij aan het vergroten van de kennis op dit gebied.

Abstract in English

The construction technique of post-tensioning is already frequently used in bridge construction, among others, but is less common in residential construction, resulting in a lack of knowledge and understanding of this technique in floor structures. This master's thesis focuses on the economic feasibility of post-tensioning in poured floor elements, considering span and load as varying parameters.

Twelve different models, consisting of flat slab floors, supported by columns with local thickening, if necessary, are dimensioned. Six of these models are calculated using the traditional reinforced method, while the remaining six models are calculated with the post-tensioning method. Different parameters, related to the local thickening of the columns, are defined for all models.

The results show that post-tensioning in floors can be advantageous for spans from 6.8 m with a live load of 3 kN/m² and from 5.8 m with a live load of 5 kN/m². It is important to note that these findings are dynamic, and the choice of a post-tensioned floor can be influenced by various external factors.

In conclusion, this master's thesis provides valuable insights into the economic feasibility of post-tensioning in reinforced floor elements and thus contributes to an increased knowledge in this area.

1. Inleiding

De bouwsector is voortdurend op zoek naar innovatieve technieken en materialen om de prestaties en efficiëntie van gebouwen te verbeteren. In dit kader is het gebruik van naspanning in ter plaatse gestorte vloerelementen een veelbelovende methode die de structurele sterkte en duurzaamheid van betonnen constructies kan vergroten. Het gebruik van naspanning heeft zich bewezen als een succesvolle techniek voor het optimaliseren van betonnen constructies en het kan een economisch interessante oplossing bieden.

Er wordt echter nog snel gegrepen naar traditionele bouwmethodes omdat ze goed gekend zijn en ingebakken zitten in de bouwwereld. Democo heeft voor een van hun projecten de omschakeling gemaakt van traditionele bouw naar bouw met naspanning, meer bepaald in de vloeren van het project. Achteraf is gebleken dat dit de meest interessante oplossing was. Daarom zijn zij via dit masterproeftopic op zoek naar meer richtlijnen om naspanning in de toekomst toe te passen.

Het doel van deze masterproef is om een onderzoek uit te voeren naar de toepassing van naspanning in ter plaatse gestorte vloerelementen. Specifieke aandacht zal worden besteed aan een economische vergelijking tussen vlakke plaatvloeren uitgevoerd met en zonder naspanning, in functie van een variabele overspanning en een variabele belasting. Hierdoor kan een aanzet gegeven worden om voor verschillende projecten na te gaan of naspanning in vloeren interessant kan zijn.

Om deze doelstellingen te bereiken, zullen er zowel experimentele analyses als theoretische berekeningen worden uitgevoerd waarbij verschillende modellen met elkaar vergeleken worden om zo na te gaan vanaf welke overspanning en bij welke belasting het interessant wordt om naspanning in vloeren toe te passen.

De resultaten van dit onderzoek zullen een inzicht verschaffen in de toepassingsmogelijkheden en de aandachtspunten van naspanning. Het onderzoek levert nuttige informatie op voor ontwerpers, aannemers en andere belanghebbenden in de bouwsector, die geïnteresseerd zijn in het verbeteren van de efficiëntie, duurzaamheid en kosteneffectiviteit van betonnen vloerconstructies.

2. Literatuurstudie

In deze masterproef worden de termen voorspanning en naspanning door elkaar gebruikt. Voorspanning wordt overkoepelend gebruikt voor 'het op spanning zetten van beton', naspanning is dus een soort voorspanning. 'Naspanning' wordt enkel gebruikt als het specifiek over voorspanning met nagerekt staal gaat.

2.1 Geschiedenis

Het voorspannen van beton, meer specifiek voorspannen van beton met nagerekt staal, is een techniek die al enkele decennia wordt toegepast. Het kent zijn eerste toepassing in 1928, wanneer er voor het eerst staal met hoge sterkte wordt gebruikt om betonnen balken voor te spannen.

De techniek werd vanaf dan verder ontwikkeld, tot er tijdens Wereld Oorlog II een tekort was aan staal. Na de oorlog zorgde dit tekort ervoor dat voorgespannen beton meer zou worden toegepast voor het herstel van beschadigde bruggen. Pas in de jaren '70 kende het terug een felle opmars doordat architecten en ingenieurs er de voordelen van inzagen [1].

2.2 Voorspanning

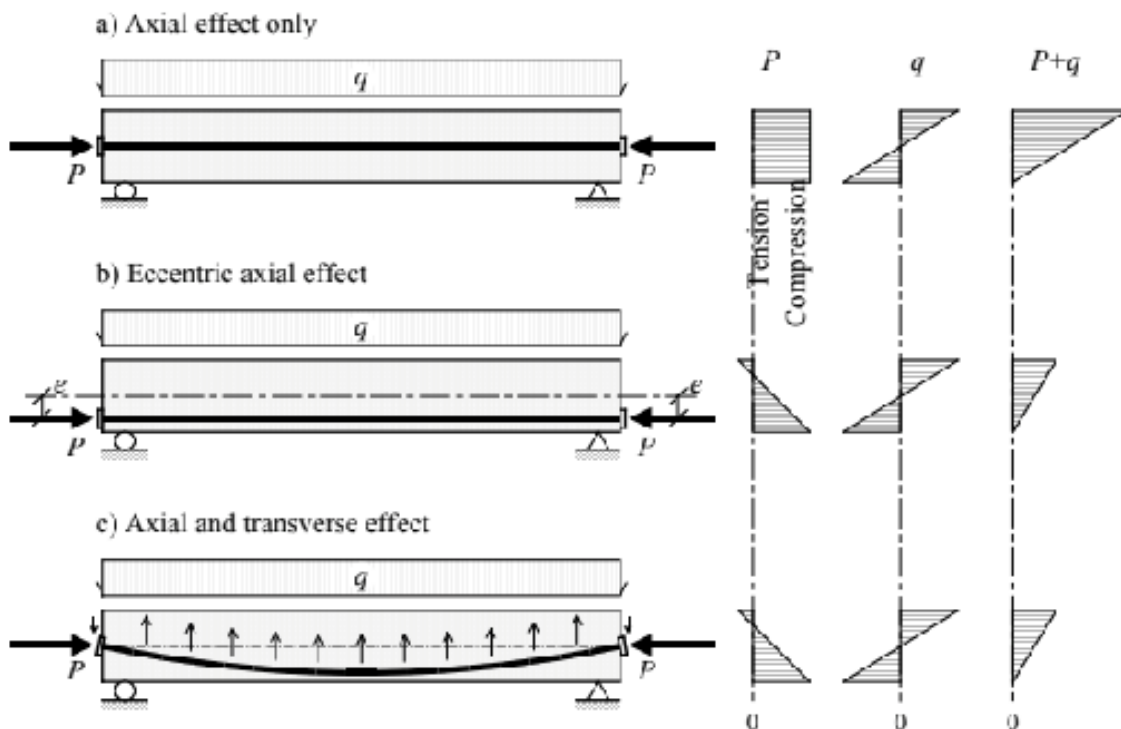
Voorgespannen beton is een algemene term die wordt gebruikt voor beton dat na uitharding op spanning wordt gebracht. Deze spanning is meer bepaald een drukspanning die wordt verwezenlijkt door het op spanning brengen van staven of strengen [2] die ofwel door het beton lopen, ofwel aan de buitenkant van het beton verankerd zijn. De voorspanning heeft een axiaal effect en een transversaal effect [3]. Het doel is om gecontroleerde spanningen te introduceren in het beton, die de trekspanningen ten gevolge van de opgelegde belastingen tot op een bepaald niveau opheffen. Dit resulteert in beton met verhoogde sterkte en stabiliteit [4].

2.3 Krachtwerking

Hoewel het doel van voorspanning in vloeren hetzelfde is als bij balken, is er bij vloeren de bijkomende mogelijkheid om in twee richtingen voor te spannen. Het principe is echter duidelijk te visualiseren aan de hand van een simpel opgelegde balk, belast met een verticale (neerwaartse) belasting. In een situatie zonder voorspanning zal de belasting een buigmoment opwekken in de balk waardoor er inwendige trekspanningen ontstaan onderaan de balk¹. Wanneer het beton eerst centrisc onder druk wordt gezet met voorspanning - met een druk die even groot is als de gezamenlijke trekkracht van de voorspanstrengen - zal de verticale

¹ De horizontale snede van waar de trekspanningen beginnen hangt af van de geometrie van de balk en de eventuele aanwezigheid van wapening. Die snede wordt de neutrale lijn genoemd. Het vormt de overgang van drukspanning naar trekspanning. In de neutrale lijn heerst noch trek- noch drukspanning en bijgevolg is er dus geen rek aanwezig.

belasting initieel zorgen voor een vermindering van de drukspanning onderaan de balk. Er ontstaan pas trekspanningen onderaan de balk vanaf het moment dat inwendige spanningen door de buiging groter worden dan de spanning van het voorspannen. Figuur 1 (a) geeft dit principe weer. De voorspankracht P zorgt voor een centrische druk over de hele doorsnede van de balk. De buiging door belasting q zorgt voor drukspanningen boven de neutrale vezel en trekspanningen onder de neutrale vezel. Door superpositie van de twee, komt een situatie tot stand die leidt tot een grote druk bovenaan de balk en weinig of geen druk onderaan de balk (afhankelijk van de grootte van de kracht P). De belasting q moet groter zijn dan een bepaalde waarde om trekspanningen te veroorzaken in de snede.



Figuur 1: Spanningen in de doorsnede van een balk ten gevolge van een opgelegde belasting in combinatie met naspanning [3]

Een gunstiger effect doet zich voor wanneer de voorspanning excentrisch aangrijpt, met name in de zone waar trekspanningen optreden onderaan de balk. Daardoor zal er een moment ontstaan dat gelijk is aan het product van de kracht P en de excentriciteit e t.o.v. de neutrale vezel. Dat moment leidt tot een afname van het piekmoment in het midden van de balk en resulteert na superpositie in een gunstiger totaal krachtenverloop in de doorsnede dan in situatie a), zoals Figuur 1 (b) weergeeft.

De voorspanning kan nog verder geoptimaliseerd worden door de strengen (bij benadering) aan te brengen in het beton volgens de momentenlijn. Dat zorgt voor een opwaartse kracht in de tegengestelde richting van de belasting waardoor de verticale krachten rechtstreeks afgeleid worden naar de steunpunten. Zonder deze opwaartse kracht, wordt de verticale belasting opgenomen door inwendige krachten van de balk. Op Figuur 1 (c) staat afgebeeld hoe de geprofileerde voorspanning zorgt voor verticale krachten die tegengesteld zijn aan de

belasting. Er zijn drie mogelijke manieren om beton voor te spannen: uitwendige voorspanning, voorspanning met voorgerekt staal en voorspanning met nagerekt staal (naspanning).

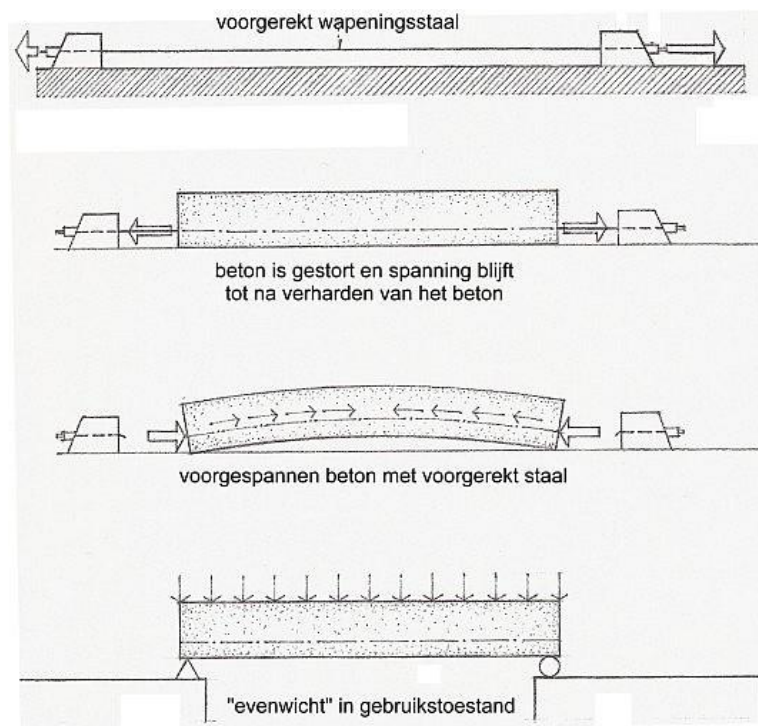
2.4 Soorten voorspanning

2.4.1 Uitwendige voorspanning

Bij deze vorm van voorspanning wordt voorspanstaal aangebracht aan de buitenkant van het beton. De strengen worden verankerd en aangespannen. De grote voordelen ervan zijn dat het op elk moment na uitharding van het betonnen element kan worden toegepast en dat het voorspanstaal periodiek geïnspecteerd kan worden. Het nadeel van deze methode is dat de kabels snel beschadigd raken waardoor ze gevoelig worden voor (put-)corrosie [2].

2.4.2 Voorspanning met voorgerekt staal

Bij voorspanning met voorgerekt staal worden stalen strengen op spanning gebracht voor ze ingestort worden. Dit gebeurt door middel van massieve verankeringsblokken, die geen beweging toestaan bij het aanspannen van de strengen. Nadat de strengen op spanning staan, wordt het beton gegoten en na uitharding van het beton worden de strengen doorgeslepen. Hierdoor wordt, dankzij de hechting tussen beton en streng, de trekspanning in de strengen omgezet in drukspanning in het beton. Figuur 2 geeft weer hoe deze techniek wordt toegepast.



Figuur 2: Principe van voorspanning met voorgerekt staal [5]

Omdat bij deze techniek vaste verankeringspunten nodig zijn, is het enkel geschikt voor prefabricage. Als de verankeringspunten voldoende ver van elkaar verwijderd zijn, is het

echter wel mogelijk om verschillende betonnen elementen achter elkaar te maken in één rij voorgespannen strengen, wat voor een grote flexibiliteit zorgt in de afmetingen van de elementen en wat de productiviteit verhoogt [4].

De voorspanning wordt in het beton geïntroduceerd door de hechting tussen beton en de voorgespannen strengen. Deze hechting komt best zo vroeg mogelijk tot stand om de effecten van de voorspanning optimaal te benutten. Daarom worden bij deze methode vooral strengen met kleine diameters gebruikt. Voor dezelfde wapeningsoppervlakte van een dwarse doorsnede, zullen kleine strengen meer contactoppervlakte (longitudinaal) hebben dan grote strengen.

Bij voorspanning met voorgerekt staal lopen de strengen hoofdzakelijk in een rechte lijn door het beton, met een excentriciteit t.o.v. de neutrale vezel (Figuur 1 (b)). Het is mogelijk om ze voor te spannen volgens de momentenlijn om gebruik te maken van het transversale effect, maar daarvoor moeten de strengen verankerd worden aan de bekisting, wat extra versteviging vraagt [3]. Dit wordt echter vermeden vanwege de eenvoud en de hoge productie-efficiëntie van het voorspannen met rechte strengen. Bovendien wordt de techniek voornamelijk gebruikt voor lineaire prefab elementen die simpel opgelegd worden op twee steunpunten. Het gebruik van de transversale component van voorspanning wordt pas echt interessant wanneer lineaire elementen doorlopen over verschillende steunpunten.

2.4.3 Voorspanning met nagerekt staal

In tegenstelling tot voorspannen met voorgerekt staal, worden de strengen bij naspanning pas aangespannen nadat het beton is uitgehard. Daarvoor worden holle plastic of gegalvaniseerde kanalen in de te storten hoogte van de plaat aangebracht die dienen om de voorspankabels van een bepaald tracé te voorzien. Dit tracé volgt de momentenlijn van het aan te spannen betonnen element onder invloed van de gebruiksbelasting. Wanneer de strengen worden aangespannen, zorgt dat tracé voor een transversaal effect dat de neerwaartse buiging tegen gaat.

De verankering van de kanalen gebeurt in het betonnen element zelf. Er zijn dus geen externe verankeringspunten nodig, wat deze methode uitermate geschikt maakt voor in situ toepassingen. Ook is het zo dat er strengen kunnen worden gebruikt met een grotere diameter, omdat de verankering bij naspanning niet meer afhangt van de hechting tussen beton en streng [3].

Wanneer alle kanalen zijn geplaatst samen met de nodige traditionele wapening in de vloer (boven-, onder-, dwarskracht-, ponswapening), wordt het beton gestort. Afhankelijk van de verankeringsmethode², worden daarna de strengen door de kanalen getrokken. De strengen worden pas op spanning gebracht wanneer het beton een minimale sterkte heeft van 30 MPa [6], om de voorspankracht te kunnen compenseren³. Bij naspanning ontleent het beton zijn interne drukspanning initieel dus niet aan de hechting tussen het beton en een voorgespannen streng, maar wel aan de krachten in de verankeringsblokken die ontstaan door het aanspannen van de strengen.

Er zijn echter twee manieren om na te spannen, nl. gebonden en ongebonden. Bij de gebonden vorm werkt de binding tussen streng en grout ook nog mee om spanning over te dragen.

2.4.3.1 Gebonden

Bij gebonden naspanning worden de strengen na aanspanning gefixeerd in hun koker d.m.v. het onder hoge druk injecteren van een groutspecie. De drie hoofddoelen daarvan zijn het beschermen van de strengen tegen corrosie; het permanent vastzetten van de gespannen strengen waardoor de afhankelijkheid van de eindverankeringen op lange termijn wordt weggenomen en het verbeteren van het structurele gedrag van de betonstructuur [4]. Bij gebonden naspanning lopen de strengen als bundels door de kanalen.

2.4.3.2 Ongebonden

Het is ook mogelijk om na te spannen met ongebonden strengen. De strengen worden dan in het beton gestort met een plastic mantel om zich heen, gevuld met een laag vet om het staal te beschermen tegen corrosie en om minder wrijving te creëren tijdens het aanspannen. Vaak zijn de strengen in dit geval niet gebundeld, maar liggen ze apart verspreid over de breedte van het betonnen element. De tussenafstand van de strengen is daardoor veel kleiner dan de tussenafstand van de kokers bij gebonden naspanning.

In tegenstelling tot gebonden naspanning, wordt het beton enkel op spanning gebracht door de verankeringskrachten aan de uiteindes van elke streng [4].

2.5 Naspanning in vloeren

De toepassingen van naspanning strekken zich uit tot verschillende structurele elementen, waaronder balken, kolommen, wanden, funderingen, vloerplaten en bruggen. Deze

² De meest gebruikelijke verankeringsmethode is met een ankerkop aan het begin en aan het einde van elk kanaal. Een andere manier om verankerung te realiseren is met een 'dood einde' van de strengen. Hierbij is er langs één kant geen ankerkop, maar komen de strengen uit in het beton en wordt verankerung bekomen door een 'bol' aan het uiteinde van de strengen. Nog een andere manier is om aan het ene einde een bocht te voorzien waardoor twee naast elkaar liggende strengen als het ware verbonden zijn. Hierbij moet rekening worden gehouden met grote voorspanverliezen.

³ De tijd die daarvoor nodig is, wordt bepaald door allerlei factoren zoals cementtype, water-cementfactor, omgevingstemperatuur, gebruik van hulpstoffen,... [22].

masterproef focust enkel op het gebruik van naspanning in ter plaatse gestorte, vlakke vloerplaten. De veelzijdigheid ervan maakt het tot een voorkeur voor bouwprojecten met specifieke eisen. Het verbetert de structurele efficiëntie en duurzaamheid van vloerplaten en biedt tegelijkertijd ontwerpflexibiliteit en kosteneffectiviteit.

Beton is van nature ongeveer tien keer sterker in druk, dan in trek [6]. Naspanning zorgt ervoor dat trekspanningen die optreden door belasting in de gebruikstoestand grotendeels of zelfs volledig worden gecompenseerd. Daardoor kan het beton efficiënter worden benut. Enkele voordelen van naspanning worden hieronder verder toegelicht.

Het gebruik van naspanning zorgt voor een reductie van de hoeveelheid traditionele wapening. Hoe meer voorspankracht er wordt gebruikt, hoe minder trekspanningen er ontstaan in de plaat en bijgevolg, hoe minder traditionele wapening er nodig is om nog trek op te vangen. Er moet echter nog steeds minimumwapening worden geplaatst voor scheurbeheersing [3]. In paragraaf 7 wordt er aangetoond hoeveel wapening er bespaard kan worden wanneer er gebruik wordt gemaakt van vloeren met naspanning.

Door het tracé van de naspanning krijgt de vloer in het midden van de overspanning een opbuigend effect. Samen met het beton dat onder druk staat, vermindert het de doorbuiging en de scheurvorming [7]. Wanneer in de praktijk naspanning wordt toegepast op een pas gestorte vloerplaat, is het gebruikelijk om tijdens het aanspannen ballasten zoals watertonnen op de vloer te zetten. De reden daarvoor is dat de vloer in dat stadium van het bouwproces nog niet belast is met zijn afwerking en daardoor de vloer aanzienlijk zou kunnen opbuigen, waarop de vloer niet is voorzien.

Om dezelfde reden kunnen er grotere overspanningen en overkragingen worden gerealiseerd die evenveel of zelfs meer belasting kunnen dragen zonder structurele bezwijkrisico's.

Bij eenzelfde overspanning zijn vloeren minder dik, waardoor de slankheid hoger ligt dan bij traditioneel gewapende vloeren. Slankheid is de verhouding l/d . Figuur 3 geeft een indicatie van de maximale overspanningen bij een bepaalde dikte, in functie van een variabele belasting [3]. Hierop is te zien dat er bij vloeren met naspanning grotere overspanningen mogelijk zijn dan bij traditioneel gewapende vloeren, bij vloeren met dezelfde plaatdikte en dezelfde variabele belasting. In paragraaf 7 wordt er dieper ingegaan op de haalbare reducties per overspanning. Bij slankere vloeren moet er wel aandacht gevestigd worden op de ponsweerstand van de plaat. Die is voor slankere vloeren lager, maar de naspanning zorgt toch voor een bepaalde verhoging van de weerstand, op voorwaarde dat de strengen een tracé hebben. In een studie van [8] wordt er aangetoond dat de ponsweerstand in beperkte mate verhoogt, zelfs bij lagere plaatdiktes. Echter, moet dit steeds per project worden gecontroleerd.

Type of slab		Imposed load, kPa	Depth mm	Maximum recommended span, m						
				0	2	4	6	8	10	12
	Simply supported	1,75	200							
		4,0	300							
	Continuous, interior span	1,75	200							
		4,0	300							
	Simply supported, span ratio ≈ 1:1	1,75	200							
		4,0	300							
Continuous, interior span, span ratio ≈ 1:1	1,75	175								
	4,0	250								
	Span ratio 1:1	1,75	200							
		4,0	300							
	Span ratio 1:1,5 (recommended longer span)	1,75	200							
		4,0	300							

Figuur 3: Maximaal haalbare overspanning voor traditioneel gewapende platen en platen met naspanning [3]

De grotere kolom-tot-kolom overspanningen en de lagere vloerdikte komen de structuur architecturaal en bouwtechnisch ten goede. Niet alleen wordt de structuur hierdoor lichter, wat meer vrijheid laat voor esthetiek, ook is het mogelijk om bij gebouwen met een gelimiteerde hoogte extra verdiepingen te voorzien [7]. Een lichtere structuur vereist daarnaast een minder zware fundering.

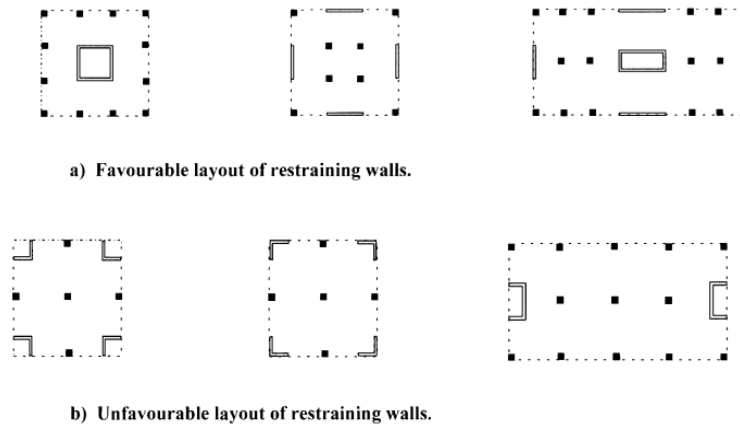
Naspanning in vloeren heeft echter ook enkele beperkingen.

Bij gebonden naspanning is de minimale dikte van de plaat slechts beperkt tot 20 cm, omdat er een minimale dikte nodig is om de kanalen van een tracé te voorzien. Dit heeft als gevolg dat naspanning bij lage overspanningen minder interessant is dan traditioneel gewapende platen, zoals wordt aangetoond in paragraaf 8.1. Bij ongebonden naspanning is de minimale dikte ongeveer 2 cm minder omdat de trekkabels rechtstreeks omhuld zijn met een plastic mantel en daardoor minder plaats nodig hebben in de totale hoogte van de plaat [3].

Er treden voorspanningsverliezen op die zeker in rekening moeten worden gebracht bij de sterkte- en stabiliteitsberekeningen. Volgens [7] zouden de verliezen kunnen oplopen van 20% tot 60% van de initiële voorspankracht. Hieronder worden enkele voorbeelden van voorspanverliezen opgesomd [9].

- Lange termijn relaxatie van het staal;
- Krimp van jong beton;
- Kruip van het beton;
- Elastische verkorting van het beton wanneer strengen niet gelijktijdig worden aangespannen;
- 'Wedge draw-in': wanneer de strengen worden vastgezet in de ankerkoppen door middel van een pin, treedt er een bepaalde verschuiving op van de pin voordat ze volledig vast staat;
- Wrijving: wanneer de strengen worden aangespannen ontstaat er wrijving op de buigpunten van de kanalen. Door die wrijving vermindert de voorspankracht naarmate de afstand tot de vijzel toeneemt. Een oplossing hiervoor is om de strengen langs beide kanten aan te spannen.

In het ontwerp van de draagconstructies moet er rekening mee gehouden worden dat vloerplaten verkorten wanneer ze worden nagespannen. De verkorting van de vloer mag niet verhinderd worden door verstijwingswanden of stabiliserende kernen. Wanneer de vloer niet vrij kan krimpen, zullen er scheuren ontstaan in de plaat. Zolang er minimum wapening voorzien is om de scheuren te beheersen, vormen de scheuren geen probleem, maar ze kunnen leiden tot een ongelijke verdeling van de axiale krachten van de naspanning [3]. Op Figuur 4 is te zien wat een gunstige lay-out van verstijwingswanden is (a) en welke lay-out best vermeden wordt (b). De gunstige lay-outs laten de vloer toe om te verkorten dwars op de richting van de verstijwingswanden.



Figuur 4: Gunstige en ongunstige lay-outs voor dragende wanden [7]

Bij de afbraak van ongebonden nagespannen vloeren is aandacht vereist. Wanneer de aangespannen strengen worden doorgezaagd, springen de strengen los en bestaat het gevaar dat de ankerkoppen uit het beton breken. De vloer verliest daarmee ook een groot deel van zijn sterkte, waardoor tijdelijke ondersteuning nodig is. Vloeren met gebonden naspanning kunnen worden afgebroken volgens erkende methoden op voorwaarde dat er kan worden verzekerd dat de kanalen volledig gevuld zijn met grout [7].

3. Bepaling model

Om het effect van naspanning op vlakke vloerplaten in kaart te brengen worden er twaalf platen met elkaar vergeleken. Enerzijds wordt er een onderscheid gemaakt tussen traditioneel gewapende vloerplaten (RC = reinforced concrete) en vloerplaten met naspanning (PT = post-tensioning). Anderzijds hebben de platen een variabele overspanning van 5, 7 en 9 m, omdat [7] en [10] suggereren dat naspanning financieel interessant wordt vanaf een overspanning van 7 m en er op die manier een kantelpunt gevonden kan worden. Elk van vooraf benoemde platen is telkens apart onderworpen aan een variabele belasting (VB) van 3 kN/m² en 5 kN/m². De permanente belasting is op elke plaat 3 kN/m². De belastingen op de plaat zijn beslist in samenspraak met Democo. Tabel 1 geeft een overzicht weer van de eigenschappen van de twaalf verschillende platen.

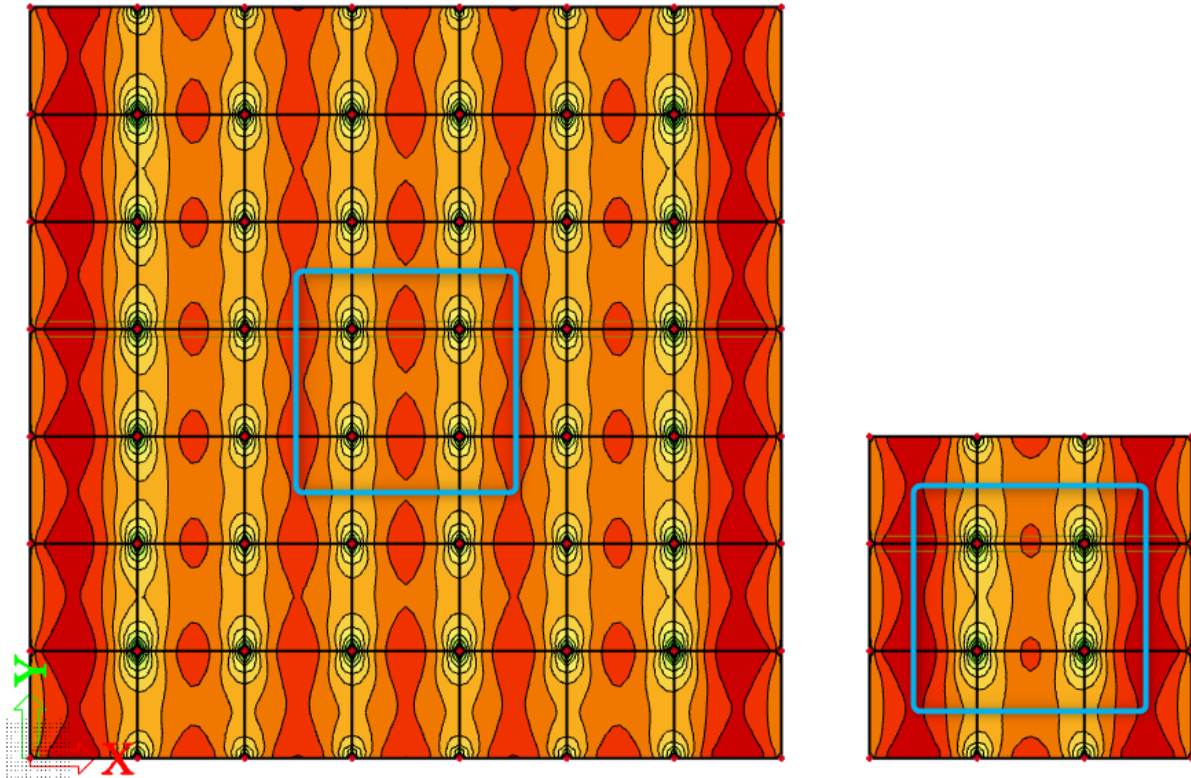
Plaatnummer	Type	Overspanning (m)	VB (kN/m ²)
1	RC	5	3
2	RC	5	5
3	RC	7	3
4	RC	7	5
5	RC	9	3
6	RC	9	5
7	PT	5	3
8	PT	5	5
9	PT	7	3
10	PT	7	5
11	PT	9	3
12	PT	9	5

Tabel 1: Plateigenschappen

De traditioneel gewapende vloerplaten worden in deze masterproef gedimensioneerd aan de hand van formules en resultaten uit het rekenprogramma SCIA. De vloeren met gebonden naspanning worden ontworpen door Interspan.

Er is gekozen voor een algemeen model dat een vierkant middenveld nabootst in een oneindig groot grid van kolommen, zodat de invloed van rand- en hoekvelden wordt geëlimineerd. Deze rand- en hoekvelden zouden in realiteit bij platen met een klein kolommengrid een groot effect hebben op het gedrag van de middenvelden en ook bepalend zijn voor de dikte van de plaat en de hoeveelheid wapening, aangezien zich daar de grootste snedekrachten voordoen. Bij platen met een groot kolommengrid zijn deze velden minder maatgevend, omdat de krachten meer gespreid worden over aangrenzende velden. Naspanning wordt veelal gebruikt bij platen met een groot kolommengrid, wat het meer economisch maakt om de platen in dat geval te dimensioneren op basis van hun middenvelden.

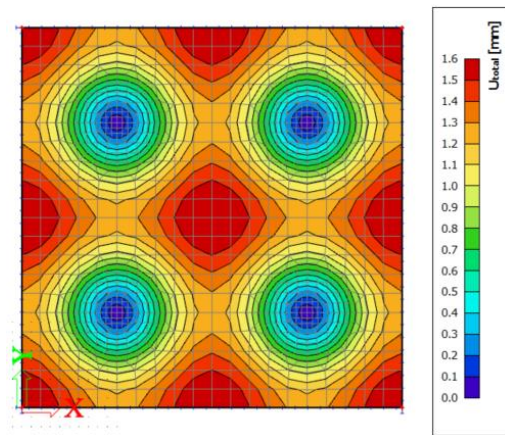
Op Figuur 5 is het verschil te zien tussen de momenten in x-richting van platen met een klein grid en platen met een groot grid. Bij het groot grid van 7x7 wegen de momenten aan de rand van de plaat relatief minder door t.o.v. de momenten in de middenvelden, in tegenstelling tot platen met een klein grid van 3x3, waar de randmomenten een grote invloed hebben op het moment in het middenveld.



Figuur 5: Invloed van randvelden op de momenten in het middenveld (SCIA)

De blauwe kader op Figuur 5 geeft de gedachtegang achter het ontwerp van de modellen weer. Er wordt een middenveld - steunend op vier kolommen - uit een 'oneindig' groot symmetrisch grid gesneden, waardoor de plaat zich in het midden hetzelfde gedraagt als aan de randen. De plaat draagt in twee richtingen.

Om dit te modelleren in SCIA, dienen de randen momentvast te zijn ingeklemd rond hun as, maar moet er nog wel een verticale translatie toegelaten worden. Figuur 6 geeft de 3D vervormingen uit SCIA weer, waarop te zien is dat de vervormingen zowel in x- als y-richting volledig symmetrisch zijn. De legende geeft de numerieke waarden van de vervormingen, maar die zijn hier niet relevant.

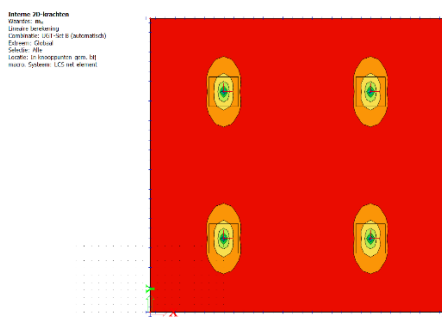


Figuur 6: 3D-vertormingen van de plaat

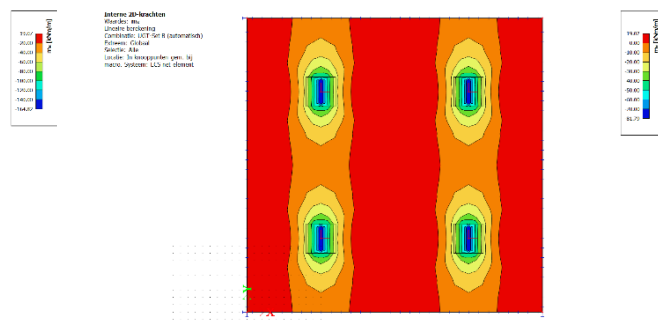
De afmetingen van de kolommen worden bepaald in paragraaf 4.8. De kolommen worden echter in SCIA gemodelleerd als scharnierende knopondersteuning. Het is niet relevant om kolommen te gebruiken als ondersteuning, aangezien ze in SCIA als 1D staafelement worden beschouwd en er geen rekening wordt gehouden met de oppervlakte van de kolom voor de bepaling van de krachten in de plaat. De oppervlakte van de kolom wordt echter wel gebruikt voor ponsberekening, maar die wordt in deze masterproef handmatig gedaan aan de hand van een Excel sheet, waarmee rechtstreeks kan worden bepaald of er een kolomkop nodig is en wat de afmetingen ervan zijn om voldoende ponscapaciteit te hebben.

De knoondersteuning zorgt voor piekwaarden in de plaat die in realiteit nooit zullen optreden, waardoor bijvoorbeeld wapeningshoeveelheden onrealistisch hoog worden. In werkelijkheid zorgt de oppervlakte van de kolom voor krachtspreiding. Daarom is er gekozen om een middelingsstrook te gebruiken van 1x1 m rondom de kolommen, die zorgt voor een herverdeling van de interne krachten in de plaat.

Figuur 7 geeft een voorbeeld van de momenten weer in x-richting van een plaat, zonder gebruik te maken van de middelingsstrook. De maximale waarde van het moment boven het steunpunt bedraagt 164,82 kNm/m. Wanneer de middelingsstroken zijn geactiveerd, halveert dat moment. Het moment bedraagt nu 81,79 kNm/m (Figuur 8).



Figuur 7: Momenten in x-richting zonder middelingsstrook



Figuur 8: Momenten in x-richting met middelingsstrook

4. Ontwerpproces – randvoorwaarden

Het proces van het ontwerpen en berekenen van de vlakke plaatvloeren, steunend op kolommen, met indien nodig een kolomkop heeft betrekking op Eurocode 2. De volgende paragrafen hebben als doel om te informeren over de benodigde informatie alvorens te kunnen starten met het gedetailleerd ontwerpen en berekenen van betonconstructies [11].

4.1 Ontwerplevensduur

De ontwerplevensduur van een gebouw, voorgesteld in Tabel 2, dient bepaald te worden om de duurzaamheidseisen van het te ontwerpen gebouw vast te leggen. In deze masterproef werd een termijn van 50 jaar gekozen aangezien dit de standaard levensduur is voor gebouwen en andere gebruikelijke constructies [12].

Ontwerplevensduur (jaren)	Voorbeelden
10	Tijdelijke constructies
10–25	Vervangbare constructie-elementen
15–30	Agrarische en vergelijkbare constructies
50	Gebouwen en andere gebruikelijke constructies
100	Monumentale gebouwen, bruggen en werken van burgerlijke bouwkunde

Tabel 2: Indicatieve ontwerplevensduren

4.2 Opgelegde belastingen

Binnen de context van de modellen wordt er een onderscheid gemaakt tussen drie verschillende belastingen, namelijk het eigengewicht van de vloerplaat, de permanente belasting en de variabele belasting.

Het eigengewicht van de constructie is afhankelijk van de dikte van de vloerplaat. Om dit te bepalen, wordt er gebruik gemaakt van volumieke gewichten. In het kader van deze masterproef werd er gekozen voor het volumiek gewicht van gewapend beton met het normale volumiek gewicht. Voor normaal beton bedraagt dit 24 kN/m^3 . Deze waarde dient verhoogd te worden met 1 kN/m^3 vanwege het aanwezige percentage wapeningsstaal. Het totale volumiek gewicht voor het beton is dus vastgesteld op 25 kN/m^3 en kan worden teruggevonden in de bijlage A van de NBN EN 1991-1-1:2002 Deel 1-1. Deze bijlage geeft de tabellen weer voor het nominale volumiek gewicht van bouwmaterialen en de hellingshoek van het natuurlijk talud van opgeslagen materialen.

Materialen	Volumiek gewicht γ kN/m ³
Beton (zie EN 206)	
Licht beton	
Gewichtsklasse LC 1,0	9,0 tot 10,0 ^{1) 2)}
Gewichtsklasse LC 1,2	10,0 tot 12,0 ^{1) 2)}
Gewichtsklasse LC 1,4	12,0 tot 14,0 ^{1) 2)}
Gewichtsklasse LC 1,6	14,0 tot 16,0 ^{1) 2)}
Gewichtsklasse LC 1,8	16,0 tot 18,0 ^{1) 2)}
Gewichtsklasse LC 2,0	18,0 tot 20,0 ^{1) 2)}
Normaal beton	24,0 ^{1) 2)}
Zwaar beton	> ^{1) 2)}
Mortel	
Cementmortel	19,0 tot 23,0
Gipsmortel	12,0 tot 18,0
Kalk-cementmortel	18,0 tot 20,0
Kalkmortel	12,0 tot 18,0
¹⁾ Te verhogen met 1 kN/m ³ voor een normaal percentage wapenings- en voorspanstaal. ²⁾ Te verhogen met 1 kN/m ³ voor niet-uitgehard beton.	
OPMERKING Zie hoofdstuk 4.	

Tabel 3: Bouwmaterialen - beton en mortel [13]

De permanente belasting heeft betrekking op de afwerking van de vloer. Deze waarde wordt constant gehouden en wordt 3 kN/m² verondersteld te zijn.

De variabele belasting is afhankelijk van de gebruiksklasse van het gebouw. Er werd gekozen om onderzoek te doen naar twee variabele belastingen q_k , namelijk 3 en 5 kN/m², die corresponderen met categorie B en categorie C5, zoals voorgesteld in Tabel 4.

Categorie	Voorbeeld	q_k (kN/m ²)	Q_k (kN)
A	Vloeren	2,0	2,0
A	Trappen	3,0	2,0
A	Balkons	4,0	2,0
B	Kantoorruimten	3,0	3,0
C5	Ruimten waar zich grote mensenmassa's kunnen bevinden, bv. in gebouwen voor openbare evenementen, zoals concertzalen, sporthallen met inbegrip van balkons, tribunes en toegangsruimten, station perrons.	5,0	4,5
D1	Ruimten in gewone kleinhandelszaken.	5,0	4,0
D2	Ruimten in grootwarenhuizen/supermarkten.	5,0	7,0
E1	Opslagruimtes met inbegrip van boeken en andere documenten	7,5	7,0
F	Garages en zones voor voertuigtransport – lichte voertuigen < 25 kN (PTAC) ≤ 30 kN	2,5	20,0

Tabel 4: Opgelegde belastingen voor gebouwen [14]

4.3 Grenstoestanden en belastingscombinaties

De norm NBN EN 1990 definieert grenstoestanden als toestanden waarbij de constructie niet langer voldoet aan de relevante ontwerpcriteria [15]. Deze grenstoestanden zijn onderverdeeld in uiterste grenstoestanden (UGT) en gebruiksgrenstoestanden (GGT). De uiterste grenstoestanden hebben betrekking op instorting of vormen van constructief bezwijken. De sterkte en stabiliteit van de constructie wordt hiermee gecontroleerd. De gebruiksgrenstoestanden komen overeen met vooropgestelde gebruikseisen zoals comfort, waaraan niet meer voldaan is [16].

De gedetailleerde uitwerking van de belastingscombinaties valt buiten deze masterproef. Hiervoor wordt er verwezen naar Eurocode 2 [16]. Deze belastingcombinaties worden automatisch gegenereerd door SCIA. Voor het ontwerp van de vlakke plaatvloer zijn enkel UGT-B, GGT-K en GGT-Q van toepassing.

De belastingcombinaties worden specifiek gebruikt voor het vastleggen van de grootte van de belastingen zodat deze belastingen gebruikt kunnen worden in de verschillende grenstoestanden.

4.4 Materiaaleigenschappen

Voor het dimensioneren van de vlakke plaatvloer is het noodzakelijk dat de karakteristieke waarden van de druksterkte van beton en de vloeigrens van staal omgevormd worden naar hun respectievelijke rekenwaarden. De rekenwaarde van de druksterkte van beton en deze van de vloeigrens van betonstaal worden meegenomen in de berekeningen voor het bepalen van de hoogte van de plaat, de ponsberekening en het controleren van spanningen.

De rekenwaarde van de betondruksterkte f_{cd} is gedefinieerd als [17]:

$$f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} * f_{ck}}{\gamma_c}$$

Waarbij:

α_{cc} = de coëfficiënt die rekening houdt met lange duur effecten op de druksterkte en van ongunstige effecten als gevolg van de manier waarop de belasting aangrijpt

f_{ck} = karakteristieke druksterkte van beton

γ_c = partiële veiligheidsfactor voor beton

De rekenwaarde van de vloeigrens van betonstaal f_{yd} is gedefinieerd als [17]:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$$

Waarbij:

f_{yk} = karakteristieke vloeigrens van staal

γ_s = partiële veiligheidsfactor voor staal

	Beton	Staal
UGT-B	$\frac{0,85 * f_{ck}}{1,50}$	$\frac{f_{yk}}{1,15}$
GGT-K	$0,60 * f_{ck}$	$0,80 * f_{yk}$
GGT-Q	$0,45 * f_{ck}$	$0,80 * f_{yk}$

Tabel 5: Formules van de rekenwaardes van beton en staal met hun respectievelijk hun veiligheidsfactoren

	Beton C30/37	BE 500S
UGT-B	17 N/mm ²	435 N/mm ²
GGT-K	18 N/mm ²	400 N/mm ²
GGt-Q	13,5 N/mm ²	400 N/mm ²

Tabel 6: Rekenwaardes van beton en staal voor C30/37

4.5 Brandweerstand

Eurocode 2, Deel 1-2: *Ontwerp en berekening van constructies bij brand*, geeft diverse en gedetailleerde berekeningsmethodes weer om de brandweerstand van betonnen elementen te berekenen. Het ontwerpen op basis van brand wordt in deze masterproef beperkt tot het gebruik van tabellen die de minimumafmetingen van de betonnen elementen vastleggen. Uitgebreide informatie over brandweerstand kan gevonden worden in gespecialiseerde literatuur.

De minimumafmetingen zijn gerelateerd aan een standaard brandweerstand. In deze masterproef werd er voor een brandweerstand van REI60 gekozen voor de vloerplaat en de kolommen. Volgens de Eurocode moet er voor een standaard brandbelasting aan drie eisen

voldaan zijn, namelijk R (mechanische sterkte van de dragende elementen), E (integriteit van de scheidende functie) en I (isolerende functie).

Tabel 7 geeft de minimumafmetingen van de kolommen weer zodat aan de bovenstaande eisen voldaan wordt. De kolommen dienen een minimumafmeting van 250 mm op 250 mm te hebben.

Standaard brandweerstand	Minimale afmetingen (mm) Kolombreedte (b_{min}) / asafstand a van de hoofdwapening	
	Kolom aan meer dan één zijde blootgesteld ($\mu_n = 0,7$)	Blootgesteld aan één zijde ($\mu_n = 0,7$)
R 60	250/46 350/40	155/25
R 120	350/57* 450/51*	175/35
R 240	-	295/70

Opmerkingen

1 Voor de toepassingsgrenzen, zie NBN EN 1992–1–2.

2 μ_n is de verhouding tussen de rekenwaarde van de normaalkracht onder brandcondities en de rekenwaarde van de draagkracht van de wand bij normale temperatuur. Conservatief mag μ_n gelijk worden gesteld aan 0.7

3 Voor voorgespannen elementen moet de asafstand uit de tabel, verhoogd worden met 10mm (staven) of 15 mm (draden en strengen)

* Minimum 8 staven

Tabel 7: Minimale kolomafmetingen en asafstanden voor kolommen met rechthoekige of ronde doorsnede [11]

Tabel 8 geeft de minimale afmetingen voor verschillende vloerplaten weer. Voor een vlakke plaatvloer, steunend op kolommen, dient er een minimale dikte van 180 mm voorzien te worden om aan de brandweerstand van REI 60 te voldoen. Er wordt dus vastgelegd dat alle vloerplaten een dikte hebben van 180 mm of meer.

Standaard Brandweerstand		Minimale afmetingen (mm)							
		Plaat dragend in één richting	Plaat dragend in twee richtingen $l_y/l_x \leq 1,5$ $1,5 < l_y/l_x \leq 2$		Vlakke plaatvloer (rustend op kolommen)	Ribbenvloer die in twee richtingen draagt en minstens in een richting doorloopt b_{min} is de ribbreedte			
REI 60	$h_s =$ $a =$	80 20	80 10	80 15	180 15	$b_{min} =$ $a =$	100 25	120 15	≥ 200 10
REI 120	$h_s =$ $a =$	120 40	120 20	120 25	200 35	$b_{min} =$ $a =$	160 45	190 40	≥ 300 30
REI 240	$h_s =$ $a =$	175 65	175 40	175 50	200 50	$b_{min} =$ $a =$	450 70	700 60	—

Opmerkingen

1 Voor de toepassingsgrenzen, zie NBN EN 1992–1–2.

2 a is de asafstand tot het buitenvlak (zie [Figuur 2.3](#)).

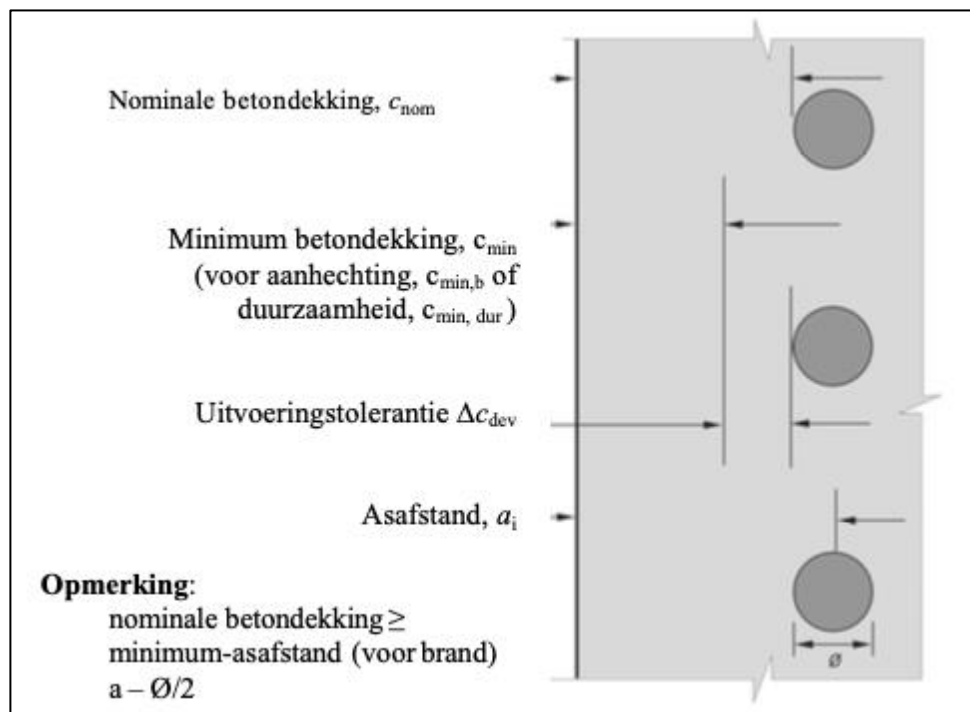
3 h_s is de plaatdikte, met inbegrip van elke niet-brandbare vloerafwerkingslaag.

Tabel 8: Minimale afmetingen en asafstanden voor vrij opgelegde of doorgaande massieve gewapende betonplaten

4.6 Betondekking

Het is belangrijk dat elk constructie-element beschermd is tegen optredende omgevingsomstandigheden. Deze omstandigheden kunnen van chemische of fysische aard zijn en kunnen invloed hebben op de duurzaamheid en stabiliteit van de constructie. Hierdoor is de ontwerper verplicht om minimale betondekking te voorzien zodat er voldoende hechting tussen staal en beton wordt verzekerd en het staal beschermd wordt tegen corrosie of invloeden van buitenaf. Tot slot draagt de betondekking bij tot het bekomen van voldoende brandweerstand.

De nominale betondekking op het betonstaal is de afstand van de buitenzijde van het staal tot het meest nabijgelegen betonoppervlak [16] en kan berekend worden als $c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}$. Figuur 9 geeft een visuele weergave van de nominale betondekking.



Figuur 9: Nominale betondekking [17]

Voor het bepalen van de nominale betondekking wordt er gebruikgemaakt van een vereenvoudigde algemene Tabel 9, afgeleid op basis van de norm NBN 1992-1-1. Deze uitgewerkte tabel is enkel geldig voor gebouwen die geen speciale kwaliteitsborging, prefab noch plaatgeometrie kenmerken maar wel een vaste bekisting bevatten.

Milieu	10	12	16	20	25	32	C_{nom} (mm)
E0	25	27	31	35	40	47	15+Ø
E1	25	27	31	35	40	47	15+Ø
EE1	35	35	35	35	40	47	15+Ø en 35 (30)
EE2	35	35	35	35	40	47	15+Ø en 35 (30)
EE3	40	40	40	40	40	47	15+Ø en 40 (35)
EE4	55	55	55	55	55	55	15+Ø en 55 (50)

Tabel 9: Nominale betondekking in functie van de milieuklassen

De aanname die wordt gemaakt in deze masterproef is dat de vlakke vloerplaat behoort tot milieuklasse E1, wat correspondeert met een binnenomgeving. De nominale betondekking C_{nom} is voor alle modellen gelijk aan $15 + \phi$ (Tabel 10).

Overspanning (m)	Variabele belasting (kN/m ²)	Betondekking C_{nom} (mm)
5	3	25
5	5	25
7	3	25
7	5	25
9	3	25
9	5	25

Tabel 10: Overzicht C_{nom} bij verschillende overspanningen

4.7 Betontype

Het ontwerpen en berekenen van gewapend beton in Eurocode 2 is gebaseerd op de karakteristieke cilinderdruksterkte en niet op de kubusdruksterkte. Tabel 11 geeft eigenschappen van het betontype weer in functie van de sterkteklassen.

Eigenschap	Sterkteklasse (MPa)								
	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
f_{ck}	12,0	16,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0
$f_{ck,cube}$	15,0	20,0	25,0	30,0	37,0	45,0	50,0	55,0	60,0
f_{cm}	20,0	24,0	28,0	33,0	38,0	43,0	48,0	53,0	58,0
f_{ctm}	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1
$f_{ctk,0,05}$	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9
$f_{ctk,0,95}$	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3
E_{cm} (GPa)	27,0	29,0	30,0	31,0	33,0	34,0	35,0	36,0	37,0

Tabel 11: Betonsterkteklassen en -eigenschappen [11]

Voor het ontwerp van een vlakke plaatvloer zonder naspanning werd er gekozen voor een betontype C30/37 voor alle drie de overspanningen. Tijdens het ontwerp is het steeds belangrijk dat de toelaatbare spanningen in het beton niet overschreden worden.

4.8 Afmetingen kolommen

Het bepalen van nauwkeurige kolomafmetingen ligt buiten het doel van deze masterproef. Er wordt daarom simpelweg gekozen voor afmetingen die voldoende groot zijn voor het beton om het gewicht van de platen te kunnen dragen. Er wordt geen rekening gehouden met knik of excentriciteitseisen. Enkel wordt er gecontroleerd of de spanningen op het kolomoppervlak de grenswaarden niet overschrijden.

Er wordt gekozen voor vierkante kolommen. De minimum kolomafmeting die nodig is voor brand is 250 mm, zoals aangehaald in paragraaf 4.5. De afmetingen worden verder vastgelegd op basis van de verschillende overspanningen en hun zwaarste belasting (plaattype 2, 4 en 6). Voor de modellen met naspanning worden per plaattype dezelfde kolomafmetingen gebruikt. Tabel 12 geeft een overzicht van de kolomafmetingen per plaattype.

Plaatnummer	1,2,7,8	3,4,9,10	5,6,11,12
Kolomafmeting (mm)	250	300	350

Tabel 12: Kolomafmetingen (mm)

In Tabel 13 wordt er voor de zwaarst belaste platen gecontroleerd of de optredende spanningen niet groter zijn dan de toelaatbare spanningen in GGT-K en GGT-Q. Er wordt geschat dat de diktes van platen 2, 4 en 6 niet dikker zullen zijn dan 250, 300 en 350 mm respectievelijk, daarom wordt er met die plaatdiktes gerekend voor de bepaling van de reactiekracht op de kolom. Wanneer na de effectieve bepaling van de dikte blijkt dat een dikte één van deze waardes overschrijdt, moet er opnieuw worden gecontroleerd of de spanningen op het kolomoppervlak niet worden overschreden. De optredende spanningen worden bepaald door de reactiekracht op de kolom in GGT-K en GGT-Q te delen door de kolomoppervlakte. Deze reactiekrachten worden bepaald door SCIA. De toelaatbare spanningen worden bepaald in paragraaf 5.4.

		GGT-K	GGT-Q
Maximale toelaatbare spanning (MPa)		18	13,5
Plaatnummer	2	5,7	4,3
	4	8,4	6,5
	6	11,1	8,8

Tabel 13: Controle spanningen kolommen

Uit Tabel 13 volgt dat de kolomafmetingen ruim voldoende groot zijn om de belasting op te kunnen nemen.

5. Ontwerpproces – dimensionering

5.1 Schatten van de wapening

De schatting van de onderwapening varieert tussen 8, 10 en 12 mm. Deze diameters zijn standaard maten voor de wapeningsnetten.

5.2 Schatten van de plaatdikte op basis van de optimale nuttige hoogte

De eerste inschatting van de plaatdikte gebeurt door de ontwerper op basis van Tabel 14, wat de verschillende slankheden per type constructief systeem toont. Aangezien er gewerkt wordt met een vlakke plaatvloer waarbij het beton onder lage spanning ($\rho = 0,5\%$) staat, is de slankheid l/d gelijk aan 24. Nadat de nuttige hoogte d bepaald is op basis van dit criterium kan de totale hoogte van de plaat geschat worden.

Constructief systeem	K	Beton onder hoge spanning $\rho = 1,5\%$	Beton onder lage spanning $\rho = 0,5\%$
Vrij opgelegde balk, in één of twee richtingen dragende vrij opgelegde plaat	1,0	14	20
Eindoverspanning van een doorgaande balk of in één richting dragende plaat of in twee richtingen dragende over één lange zijde doorgaande plaat	1,3	18	26
Tussenoverspanning van een balk of een in één of twee richtingen dragende plaat	1,5	20	30
Plaat opgelegd op kolommen zonder balken (vlakke plaatvloer) (gebaseerd op de langste overspanning)	1,2	17	24
Uitkraging	0,4	6	8

OPMERKING 1 De gegeven waarden zijn zo gekozen dat ze in het algemeen conservatief zijn; berekening kan veelal aantonen dat slankere elementen mogelijk zijn.

OPMERKING 2 Voor in twee richtingen dragende platen behoort de controle te zijn uitgevoerd op basis van de kortste overspanning. Voor vlakke plaatvloeren behoort de langste overspanning te zijn genomen.

OPMERKING 3 De voor vlakke plaatvloeren gegeven grenzen komen overeen met een minder strenge begrenzing dan een doorbuiging in het midden van de overspanning ter grootte van overspanning/250 ten opzichte van de kolommen. Ervaring heeft uitgewezen dat dit voldoende is.

Tabel 14: Basisslankheden voor gewapend betonnen elementen zonder normaaldruk

Vervolgens wordt er een opsplitsing gemaakt voor het bepalen van d optimaal op basis van het veldmoment en op basis van de piekmomenten. Deze momenten worden bepaald door SCIA met behulp van een integratiestrook. De momenten worden ingevuld in de juiste formules waarna een optimale nuttige hoogte d berekend kan worden⁴. Bij deze optimale nuttige hoogte wordt de betondekking (C_{nom}) en de helft van de geschatte diameter ($\frac{\emptyset}{2}$) opgeteld. Hierna is de definitieve totale hoogte gekend. De formule voor de totale hoogte is gedefinieerd als:

$$h = d + C_{nom} + \frac{\emptyset}{2}$$

⁴ De afleiding voor de formule van de optimale nuttige hoogte kan teruggevonden worden in bijlage A.

Dit is een iteratief proces waarbij de iteratie stopt wanneer de geschatte totale hoogte gelijk blijft aan de berekende totale hoogte.

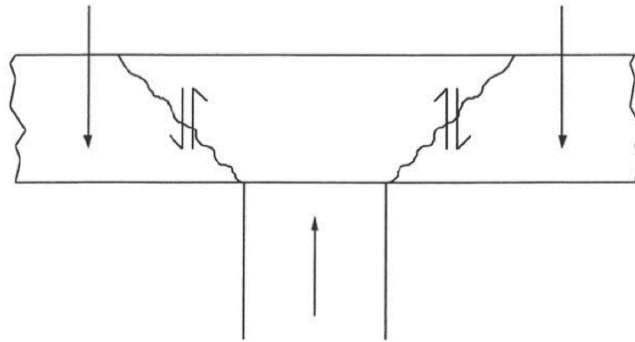


Om, tot slot, de definitieve dikte van de plaat te bepalen, wordt er rekening gehouden met de hoogte op basis van d optimaal, de brandeisen en de minimumruimte (lijf⁵) die nodig is om de wapening te kunnen plaatsen.

5.3 Pons

Na het bepalen van de dikte van de plaat wordt de plaat gecontroleerd op pons. Pons is een tweedimensionale dwarskracht en is een afschuivingsprobleem. Het is een fenomeen dat optreedt wanneer platen ondersteund worden door elementen met een klein contactoppervlak en de plaat onvoldoende weerstand kan bieden tegen de tweedimensionale dwarskracht, waardoor er grote spanningen en scheuren in het beton ontstaan rondom de ondersteuning. Deze ondersteuning wordt dan door de plaat gedrukt. Het breukpatroon van pons is te zien op Figuur 10. Het falende stuk wordt onder een hoek van 26,7° uit de plaat gedrukt [16].

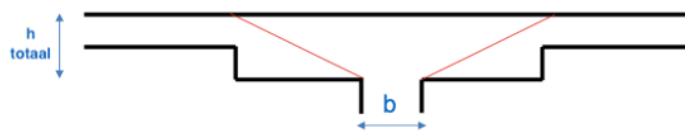
⁵ Het lijf wordt zelf gekozen om een logische inschatting te maken van de nodige ruimte om de wapening te kunnen plaatsen en zodat er voldoende ruimte is tussen boven- en onderwapening.



Figuur 10: Ponskracht

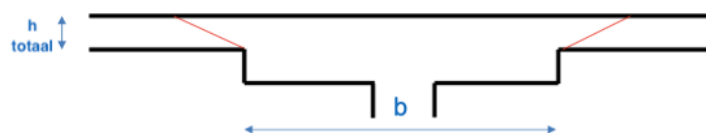
Indien de ponskrachten te hoog oplopen in de plaat, kunnen er kolomkoppen of ponswapening geplaatst worden. Er is gekozen om de aanwezige ponskrachten op te vangen met kolomkoppen. De afmetingen en de hoogte van de kolomkop dienen bijgevolg bepaald te worden.

Hiervoor dienen twee controles uitgevoerd te worden. Bij de eerste controle wordt er gecontroleerd of de kolom niet door de kolomkop en vloerplaat samen pons. In deze situatie is de totale hoogte gelijk aan de dikte van de kolomkop en de dikte van de plaat zoals aangeduid in Figuur 11.



Figuur 11: Eerste ponscontrole

Bij de tweede controle wordt er nagegaan of de kolomkop niet door de plaat zelf pons. In deze situatie is de totale hoogte gelijk aan de dikte van de plaat zoals aangeduid in Figuur 12.



Figuur 12: Tweede ponscontrole

Voor de werkwijze voor het nazicht van de ponsweerstand wordt er verwezen naar [11].

Indien de aangrijpende schuifspanning v_{Ed} kleiner is dan de weerstandbiedende schuifspanning v_{rd} dan is er geen lokale verdikking nodig. Via trial and error wordt er gezocht naar de (minimum) waarden van de verdikking zodat $v_{Ed} \geq v_{rd}$.

5.4 Spanningscontrole

Na bepaling van de dikte van de plaat en de controle op pons, wordt er een spanningscontrole uitgevoerd. Deze controle wordt gedaan door SCIA. De drukspanningen in het beton mogen een bepaalde limietwaarde, afhankelijk van het type beton, niet overschrijden in GGT-K en GGT-Q om het functioneren van de constructie niet te belemmeren en onaanvaardbare scheuren in het beton te vermijden [17]. De grootste spanningen bevinden zich boven de kolommen. Om deze pieken weg te werken wordt de kolomkop voldoende dik gemaakt zodat de spanningen boven de kolom verkleinen, en voldoende breed zodat de spanningen zich concentreren boven de kolom en niet aan de randen van de kolomkop.

Toelaatbare spanning in GGT-Q voor een betontype C30/37:

$$GGT - Q = 0,45 * f_{ck} = 0,45 * 30 = 13,5 \text{ MPa}$$

Toelaatbare spanning in GGT-K voor een betontype C30/37:

$$GGT - K = 0,60 * f_{ck} = 0,60 * 30 = 18 \text{ MPa}$$

5.5 Wapening

De wapening in de plaat wordt bepaald door SCIA. De onder- en bovenwapening wordt samen met de bijlegwapening ingevoerd met hun respectievelijke tussenafstanden. SCIA voert zelf een controle uit of de gekozen wapening voldoet. Indien de wapening niet voldoet, moet de wapening vergroot worden zodat de plaat voldoende gewapend is. Ter hoogte van de kolommen dient er bijlegwapening voorzien te worden om het moment boven de steunpunten op te vangen. Er wordt een zone afgebakend boven de kolommen waarover bijlegwapening geplaatst wordt.

Ten eerste, wordt er gecontroleerd of de voorziene wapening de maximum wapening niet overschrijdt. De maximum wapening kan bepaald worden door:

$$A_{s,max} = 0,04 bh = 40h$$

Daarna wordt er nagegaan of de voorziene wapening groter is dan de benodigde minimum wapening. Er dienen twee checks op minimumwapening uitgevoerd te worden, namelijk minimumwapening voor scheurbeheersing en minimumwapening tegen brosse breuk van de vloerplaat.

De formule voor minimumwapening voor scheurbeheersing is gedefinieerd als [17]:

$$A_{s,min} = 0,120 * f_{ck}^{\frac{2}{3}} * h$$

De formule voor minimumwapening tegen brosse is gedefinieerd als [17]:

$$A_{s,min} = 0,156 * f_{ck}^{\frac{2}{3}} * d \geq 1,3 * d$$

5.6 Scheurwijdtecontrole

Scheurwijdtes moeten beperkt worden tot een limietwaarde zodat de duurzaamheid van de constructie gewaarborgd blijft. In alle milieu- en omgevingsklassen is de maximaal toelaatbare scheurwijdte beperkt tot 0,3 mm, terwijl voor omgevingsklasse EI deze waarde 0,4 mm bedraagt (Tabel 15). De modellen in deze masterproef zijn gedefinieerd als omgevingsklasse EI waardoor de maximaal toelaatbare scheurwijdte 0,4 mm is. De scheurwijdte van de vloerplaat wordt berekend door SCIA in GGT-Q.

Tabel 7.1N-ANB – Aanbevolen waarden van w_{max} (mm)			
Blootstellings-klasse	Milieuklasse	Gewapende en voorgespannen onderdelen met voorspanning zonder aanhechting	Voorgespannen onderdelen met voorspanning met aanhechting
		Quasi-blijvende belastingscombinatie	Frequente belastingscombinatie
X0, XC1	EI	0,4 ¹	0,2
XC2, XC3, XC4	EE1, EE2, EE3	0,3	0,2 ²
XD1, XD2, XD3, XS1, XS2, XS3	EE4, ES1, ES2, ES3, ES4		Decompressie

Opmerking 1 Voor deze blootstellingsklasse X0 en XC1 en de milieuklasse EI, heeft de scheurwijdte geen invloed op de duurzaamheid ; deze grens is gesteld om een acceptabel uiterlijk te verzekeren. Bij afwezigheid van voorwaarden ten aanzien van het uiterlijk mag deze beperking worden afgezwakt.

Opmerking 2 Voor deze blootstellings- en milieuklassen moet, aanvullend, decompressie onder de quasi-blijvende belastingscombinatie worden getoetst.

Tabel 15: Aanbevolen waarden w_{max} (mm) [18]

5.7 Doorbuiging

De laatste controle die uitgevoerd dient te worden is de doorbuiging. De ontwerper moet ervoor zorgen dat de constructie goed functioneert zodat het uiterlijk van de constructie en het comfort van de gebruiker niet nadelig beïnvloed wordt [17]. Deze controle wordt uitgevoerd door SCIA. Voor vlakke plaatvloeren steunend op kolommen is een handberekening te complex en onvolledig om een correcte waarde te bekomen. In deze masterproef is er, in samenspraak met Interspan, beslist om aan een doorbuigingseis van L/300 te voldoen. Voor een overspanning van 5, 7 en 9 m, bedraagt de maximale doorbuiging respectievelijk 16,67 mm, 23,33 mm en 30 mm.

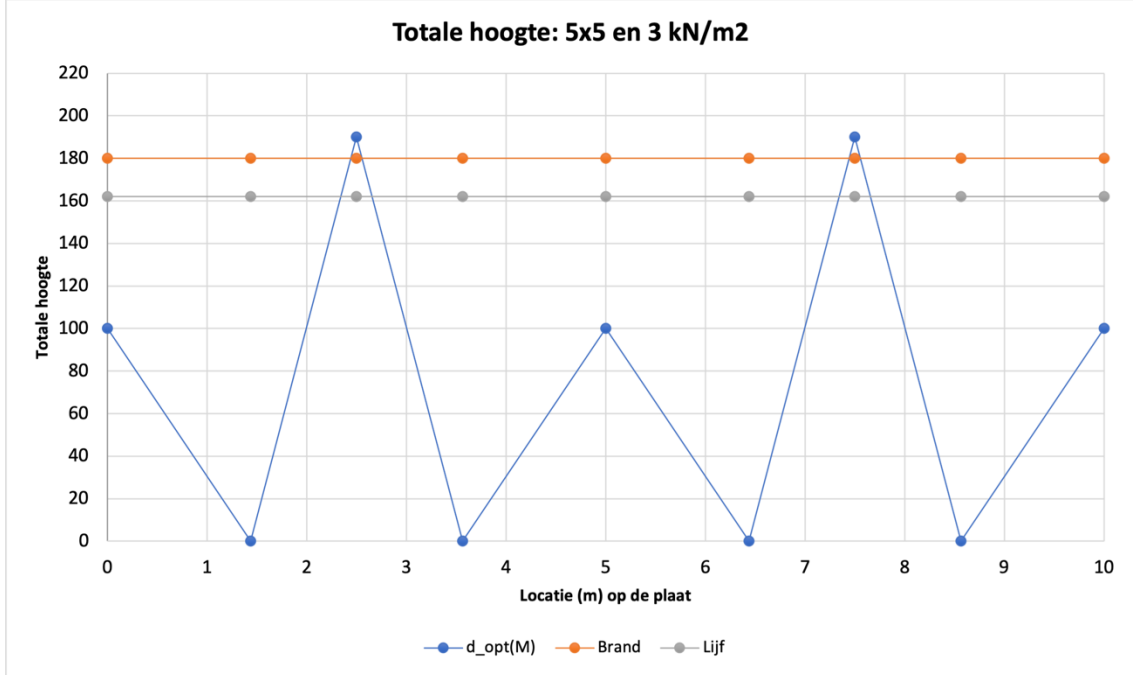
6. Berekening traditioneel gewapende vloerplaat

6.1 Plaat 1

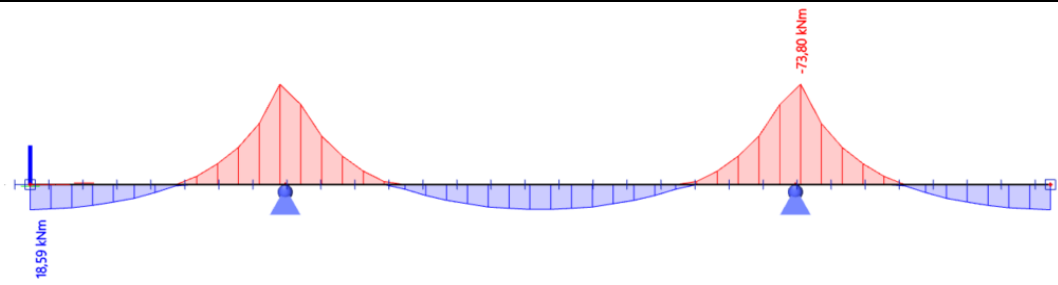
In deze paragraaf worden de berekeningen weergegeven voor plaat 1 door middel van formulieren en resultaten uit SCIA. Voor platen 2 t.e.m. 6 wordt er verwezen naar bijlage B t.e.m. F respectievelijk.

Bepalen dikte plaat				
Bepalen dikte plaat 5x5 en 3 kN/m²				
Grenstoestand	UGT-B			
Betonkwaliteit	f_{ck}	30 N/mm ²		
Langeduureffect bij buiging	α_{cc}	0,85 (-)		
Materiaalfactor beton	γ_m	1,5 (-)		
Rekenwaarde betonkwaliteit	f_{cd}	17 N/mm ²		
Staalkwaliteit	S	500 N/mm ²		
Materiaalfactor staal	γ_s	1,15 (-)		
Rekenwaarde staalkwaliteit	f_{yd}	435 N/mm ²		
Overspanning	L	5 m		
Variabele gebruiksbelasting	q	3 kN/m ²		
Schatting onderwapening		10 mm		
Schatting bovenwapening		16 mm		
Nominale betondekking	C_{nom}	25 mm		
Slankheid	L/d	24 (-)		
Geschatte optimale nuttige hoogte	d	208 mm		
Veldmoment				
Geschatte hoogte	h	240	120	110
Buigmoment (veld)	M_{sd}	21,1	15,67	14,84
Optimale nuttige hoogte	d_{opt}	81	70	68
Totale hoogte	h_{tot}	120	110	100
Piekmoment				
Geschatte hoogte	h	240	200	190
Buigmoment (veld)	M_{sd}	83,7	75,5	73,8
Optimale nuttige hoogte	d_{opt}	162	154	152
Totale hoogte	h_{tot}	200	190	190
Totale hoogte op basis van veldmoment	h_{tot}	100 mm		
Totale hoogte op basis van piekmoment	h_{tot}	190 mm		
Totale hoogte op basis van brand	h_{tot}	180 mm		
Totale hoogte op basis van lijf	h_{tot}	162 mm		
Gekozen totale hoogte	h_{tot}	190 mm		

Grafiek



Integratiestroom



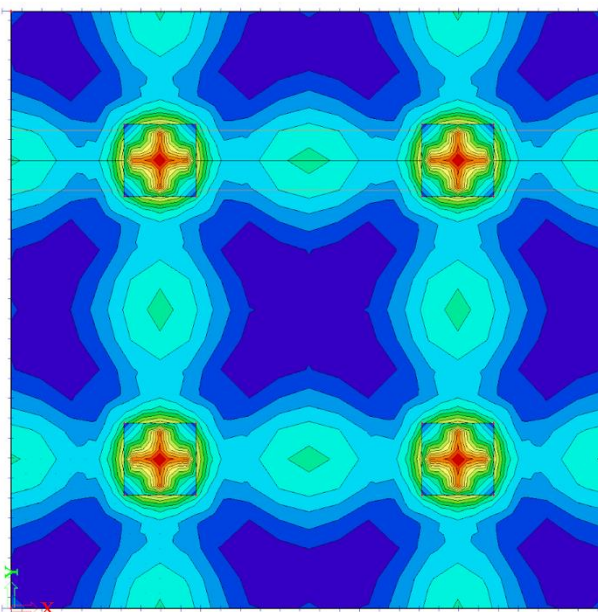
Ponscontrole

Ponscontrole: plaat 5x5 en 3kN/m ²							
Controle pons (kolom door kolomkop + plaat)			Controle pons (kolomkop door plaat)				
Grenstoestand	UGT-B		Grenstoestand	UGT-B			
Betonkwaliteit	f_{ck}	30 N/mm ²	Betonkwaliteit	f_{ck}	30 N/mm ²		
Langeduureffect bij buiging	α_{cc}	0,85 (-)	Langeduureffect bij buiging	α_{cc}	0,85 (-)		
Materiaalfactor beton	γ_m	1,5 (-)	Materiaalfactor beton	γ_m	1,5 (-)		
Rekenwaarde betonkwaliteit	f_{cd}	17 N/mm ²	Rekenwaarde betonkwaliteit	f_{cd}	17 N/mm ²		
Staalkwaliteit	S	500 N/mm ²	Staalkwaliteit	S	500 N/mm ²		
Materiaalfactor staal	γ_s	1,15 (-)	Materiaalfactor staal	γ_s	1,15 (-)		
Rekenwaarde staalkwaliteit	f_{yd}	435 N/mm ²	Rekenwaarde staalkwaliteit	f_{yd}	435 N/mm ²		
Overspanning	L	5 m	Overspanning	L	5 m		
Variabele gebruiksbelasting	q	3 kN/m ²	Variabele gebruiksbelasting	q	3 kN/m ²		
Nominale betondekking	C_{nom}	25 mm	Nominale betondekking	C_{nom}	25 mm		
Voorspanning	σ_{cp}	0 N/mm ²	Voorspanning	σ_{cp}	0 N/mm ²		
Afmetingen kolom	a	250 mm	Afmetingen kolomkop	a	1200 mm		
	b	250 mm		b	1200 mm		
Hoogte van de plaat	h	190 mm	Hoogte van de plaat	h	190 mm		
Hoogte kolomkop	h_{cap}	100 mm	Hoogte kolomkop	h_{cap}	mm		
Totale hoogte	h_{tot}	290 mm	Totale hoogte	h_{tot}	190 mm		
Bovenwapening			Bovenwapening				
A_{sx}	ϕ_1	16 à 100 mm	A_{sx}	ϕ_1	16 à 100 mm		
A_{sy}	ϕ_2	16 à 100 mm	A_{sy}	ϕ_2	16 à 100 mm		
Onderwapening			Onderwapening				
A_{sx}	ϕ_1	10 à 150 mm	A_{sx}	ϕ_1	10 à 150 mm		
A_{sy}	ϕ_2	10 à 150 mm	A_{sy}	ϕ_2	10 à 150 mm		
Reactiekracht kolom	V_{Ed}	371 kN	Reactiekracht kolom	V_{Ed}	371 kN		
Schets			Schets				
Berekening							
Nuttige hoogte x-richting (mm)	16 n_1	10 d_1	257	Nuttige hoogte x-richting (mm)	16 n_1	10 d_1	157
Nuttige hoogte y-richting (mm)	16 n_2	10 d_2	241	Nuttige hoogte y-richting (mm)	16 n_2	10 d_2	141
Gemiddelde nuttige hoogte	d	249 mm		Gemiddelde nuttige hoogte	d	149 mm	
Gemiddeld wapening %	ρ_x	0,0078 (-)		Gemiddeld wapening %	ρ_x	0,0128 (-)	
	ρ_y	0,0083 (-)			ρ_y	0,0143 (-)	
	ρ	0,0081 (-)			ρ	0,0135 (-)	
	v	0,528 (-)			v	0,528 (-)	
Maximale ponsweerstand	$V_{rd,max}$	4,488 N/mm ²		Maximale ponsweerstand	$V_{rd,max}$	4,488 N/mm ²	
Krit omtrek dagvlak	μ_0	1000 mm		Krit omtrek dagvlak	μ_0	4800 mm	
1ste krit omtrek	μ_{midden}	4129,03 mm		1ste krit omtrek	μ_{midden}	6672,39 mm	
	β_{midden}	1,15 (-)			β_{midden}	1,15 (-)	
Controle	$V_{Ed,midden,0}$	1,715 N/mm ²		Controle	$V_{Ed,midden,0}$	0,597 N/mm ²	
Max ponsweerstand				Max ponsweerstand			
Rekenwaarde aangrijpende schuifspanning	$V_{Ed,midden}$	0,415 N/mm ²		Rekenwaarde aangrijpende schuifspanning	$V_{Ed,midden}$	0,430 N/mm ²	
	k	1,90 (-)			k	2,00 (-)	
	$V_{rd,min}$	0,501 N/mm ²			$V_{rd,min}$	0,542 N/mm ²	
Weerstandbiedende schuifspanning bijdrage beton	$V_{rd,c}$	0,659 N/mm ²		Weerstandbiedende schuifspanning bijdrage beton	$V_{rd,c}$	0,824 N/mm ²	
Kolomkop nodig?	nee			Kolomkop nodig?	nee		
Grenswaarde	450 x 450 x 30			Grenswaarde	450 x 450 x 30		
Gekozen waarde	1200 x 1200 x 100			Gekozen waarde	1200 x 1200 x 100		

Spanningscontrole

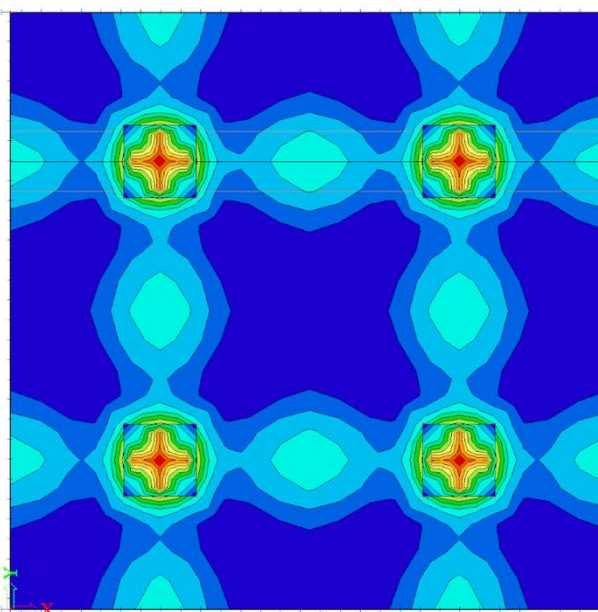
GGT-Q (3,9 MPa < 13,5 MPa → OK)

2D spanning/ rek
 Waardes: α_s
 Lineaire berekening
 Combinaties: BGT quasi (automatisch)
 Extreem: Globaal
 Selectie: Alle
 Localisatie: In knooppunten gem. bij macro. Systeem: LCS net element



GGT-K (4,8 MPa < 18 MPa → OK)

2D spanning/ rek
 Waardes: α_s
 Lineaire berekening
 Combinaties: BGT-kr (automatisch)
 Extreem: Globaal
 Selectie: Alle
 Localisatie: In knooppunten gem. bij macro. Systeem: LCS net element



Wapening

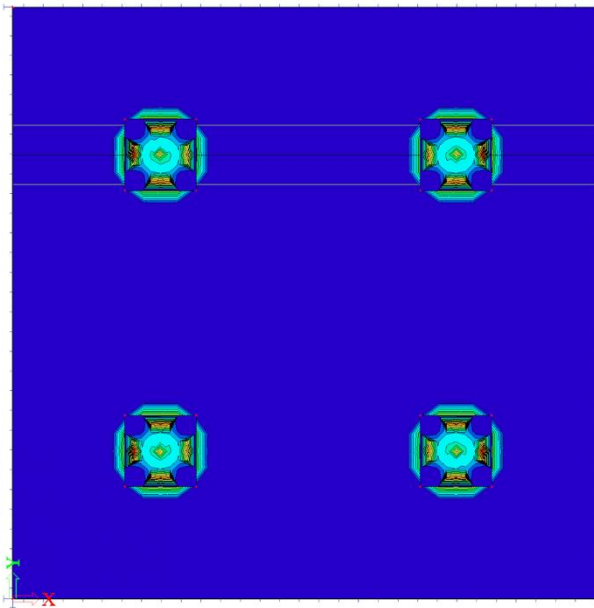
Minimum wapening				Maximum wapening			
Brosse breuk (mm ² /m)	243	>	209	Maximum wapening (mm ²)	7600		
Scheurbeheersing (mm ²)	220						

Overzicht wapening plaat 5x5 en 3 kN/m ²											
	ϕ	\dot{a}	A_s	mm ² /m	mm ²	mm ³	m ³	kg/m ³	kg		kg
Onderwapening	8	150	335	335	3351,03	33510321,64	0,0335	7850	263,1	x2	526,1
Bovenwapening	8	150	335	335	3351,03	33510321,64	0,0335	7850	263,1	x2	526,1
Bijlegwapening	16	100	2011	2011	4021,24	10053096,49	0,0101	7850	78,9	x8	631,3
Totaal											1683,6

Bijlegzone kolommen	
Lengte (m)	Breedte (m)
2,5	2

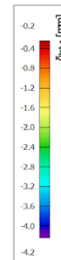
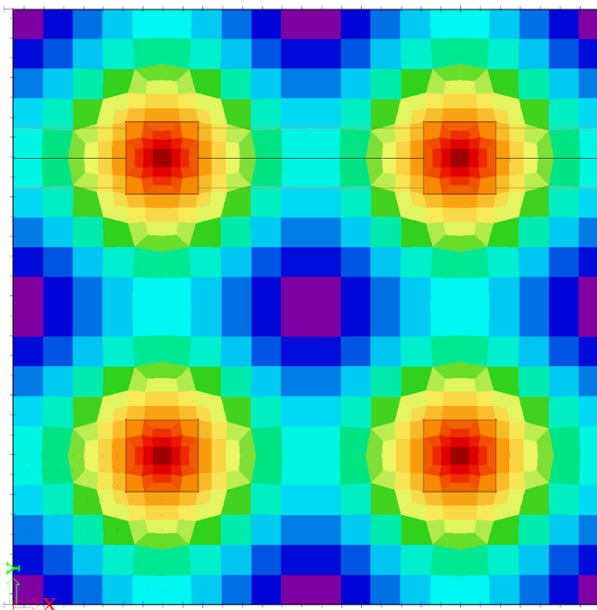
Scheurwijdte W_{max}

Scheurwijdte (BGT)
 Waardes: w_s
 Lineaire berekening
 Combinaties: BGT-quasi (automatisch)
 Extreem: Globaal
 Selectie: Alle
 Localis: In knooppunten gem. bij
 macro. Systeem: LCS net element



Doorbuiging $\delta_{tot,z}$ GGT-Q (L/300)

Normaalhankelijke vervormingen
 Waardes: $\delta_{tot,z}$
 Lineaire berekening
 Combinaties: BGT-quasi (automatisch)
 Extreem: Globaal
 Selectie: Alle
 Localis: In centrum. Systeem: LCS net element
 Componenten van interne krachten parallel aan de rib worden binnen de effectieve breedte van de rib als nul in aanmerking genomen.
 Systeem: LCS net element
 NAV selectie: Alle



7. Materiaalhoeveelheden

Tabel 16 geeft de materiaalhoeveelheden weer van de traditioneel gewapende vloeren

Vlakte plaatvloer zonder voorspanning met nagerekt staal - Hoeveelheden per type plaat																		
Nummer	Type Vloer	Overspanning m	Belastingen		Type Beton	Dikte mm	Kolom mm	Kolomkop			Opp m ²	V Beton Vloer m ³	V Beton kolomkop m ³	V beton tot m ³	Post Tension		Wapening	
			Permanent (kN/m ²)	Variabel (kN/m ²)				L (mm)	B (mm)	H (mm)					kg	kg/m ²	kg	kg/m ³
1	RC Flat Slab	5	3	3	C30/37	190	250x250	1200	1200	100	100	19	0,576	19,576	/	/	0	0
2	RC Flat Slab	5	3	5	C30/37	200	250x250	1200	1200	100	100	20	0,576	20,576	/	/	0	0
3	RC Flat Slab	7	3	3	C30/37	250	300x300	1300	1300	130	196	49	0,8788	49,8788	/	/	0	0
4	RC Flat Slab	7	3	5	C30/37	260	300x300	1400	1400	150	196	50,96	1,176	52,136	/	/	0	0
5	RC Flat Slab	9	3	3	C30/37	300	350x350	2000	2000	200	324	97,2	3,2	100,4	/	/	0	0
6	RC Flat Slab	9	3	5	C30/37	320	350x350	2000	2000	250	324	103,68	4	107,68	/	/	0	0

Tabel 16: Hoeveelheden RC per type plaat

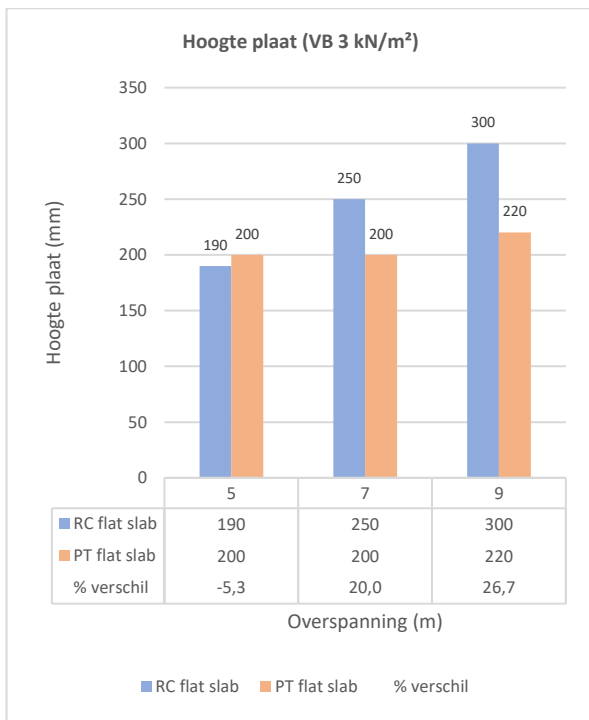
Tabel 17 geeft de materiaalhoeveelheden weer van de vloeren met naspanning

Vlakte plaatvloer met voorspanning met nagerekt staal - Hoeveelheden per type plaat																		
Nummer	Type Vloer	Overspanning m	Belastingen		Type Beton	Dikte mm	Kolom mm	Kolomkop			Opp m ²	V Beton Vloer m ³	V Beton kolomkop m ³	V beton tot m ³	Post Tension		Wapening	
			Permanent (kN/m ²)	Variabel (kN/m ²)				L (mm)	B (mm)	H (mm)					kg	kg/m ²	kg	kg/m ³
7	PT Flat Slab	5	3	3	C35/45	200	250x250	/	/	/	100	20	/	20	235	2,35	1100	55
8	PT Flat Slab	5	3	5	C35/45	200	250x250	/	/	/	100	20	/	20	235	2,35	1100	55
9	PT Flat Slab	7	3	3	C35/45	200	300x300	1500	1500	70	196	39,515	0,63	40,145	857	4,37	2648	67
10	PT Flat Slab	7	3	5	C35/45	200	300x300	1500	1500	100	196	39,65	0,9	40,55	857	4,37	2657	67
11	PT Flat Slab	9	3	3	C35/45	220	350x350	2000	2000	150	324	72,48	2,4	74,88	1441	4,45	4856	67
12	PT Flat Slab	9	3	5	C35/45	230	350x350	2000	2000	190	324	76,04	3,04	79,08	1441	4,45	5095	67

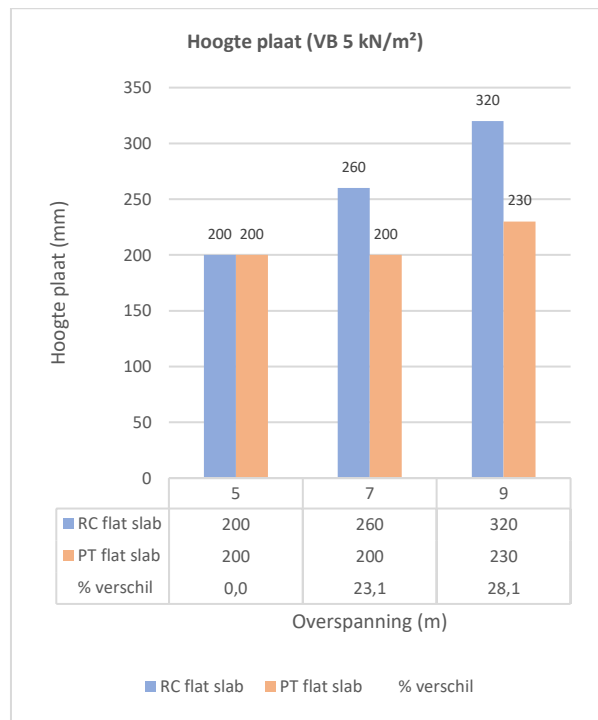
Tabel 17: Hoeveelheden PT per type plaat

Het dient opgemerkt te worden dat bij de platen met naspanning betonsterkteklasse C35/45 wordt gebruikt. Dat is de minimale betonsterkteklasse die nodig is, omdat het beton minstens een sterkte van 30 MPa nodig heeft voordat er aangespannen kan worden.

De waarden van de hoogte van de plaat worden weergegeven in Figuur 13 en Figuur 14. Uit deze tabellen kan worden afgeleid dat de vloerplaten met naspanning steeds dunner zijn dan de traditioneel gewapende vloerplaten. Plaattype 7 is de enige uitzondering. Deze plaat is 10 mm hoger dan zijn traditioneel gewapende variant. Dat valt te verklaren door de minimale hoogte die nodig is bij vloeren met naspanning, om de kanalen van een bepaald tracé te voorzien in de plaat. Ook bij de overspanning van 7 m is de vloerdikte nog steeds beperkt tot de minimaal nodige dikte. Verder valt het op dat het verschil in hoogte van de plaat groter wordt bij grotere overspanningen en bij hogere belastingen. Bij een variabele belasting van 5 kN/m² kan er vanaf 9 m 28,1% worden bespaard op de dikte van de plaat. Dat is meteen ook de voornaamste reden dat naspanning pas financieel interessant wordt vanaf een bepaalde overspanning, in functie van een opgelegde belasting.

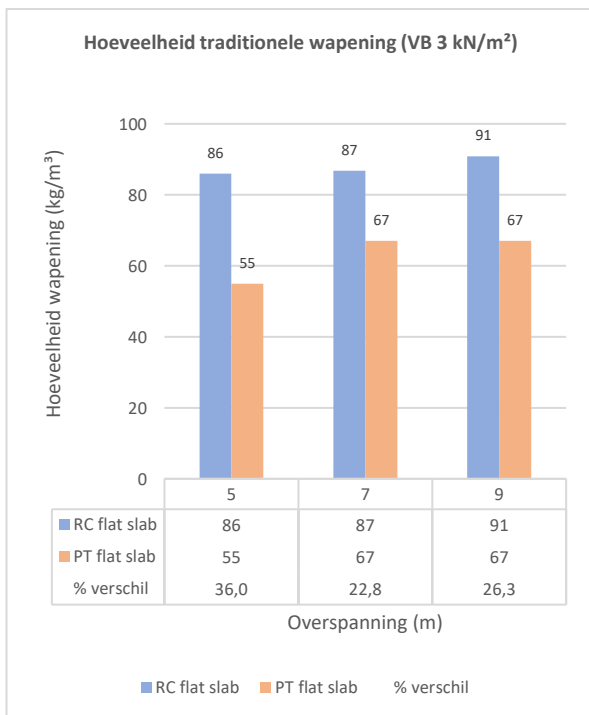


Figuur 13: Plaathoogte in functie van de overspanning voor platen met een VB van 3 kN/m²

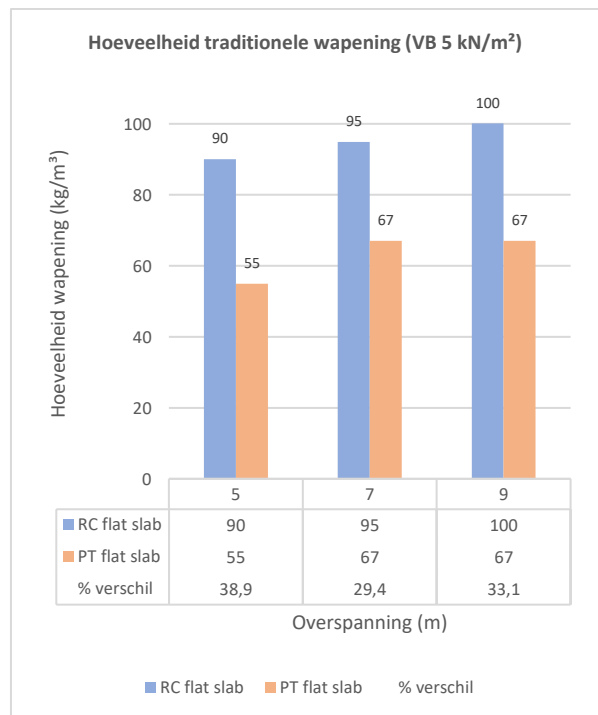


Figuur 14: Plaathoogte in functie van de overspanning voor platen met een VB van 5 kN/m²

Figuur 15 en Figuur 16 geven de hoeveelheid traditionele wapening, uitgedrukt in kg/m³ beton, weer. Er moet opgemerkt worden dat het staal van de naspanstrengen hier niet bijgeteld is. Wanneer dit er echter wel wordt bijgeteld, zal de totale hoeveelheid staal bij vloerplaten met naspanning nog steeds lager liggen dan bij de traditioneel gewapende vloerplaten.

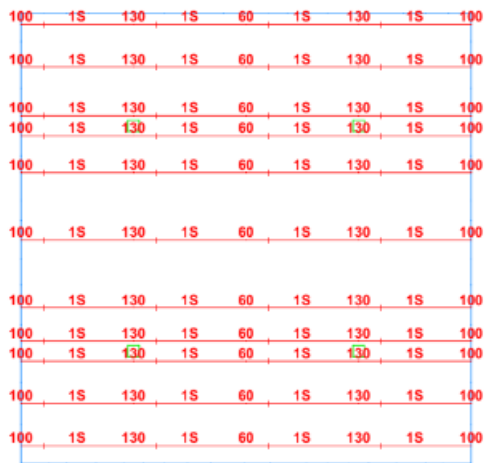


Figuur 15: Hoeveelheid wapening in functie van de overspanning voor platen met een VB van 3 kN/m²

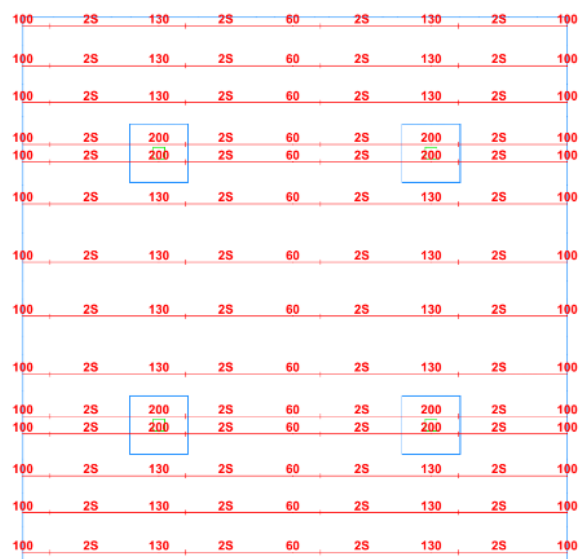


Figuur 16: Hoeveelheid wapening in functie van de overspanning voor platen met een VB van 5 kN/m²

Algemeen kan er worden gesteld dat naspanning een groot deel van de traditionele wapening vervangt. Verder volgt uit deze twee tabellen dat er bij een overspanning van 5 m steeds het grootste verschil is tussen de hoeveelheid wapening in de traditioneel gewapende vloerplaat en de vloerplaat met naspanning. Een logische verklaring hiervoor is dat de hoogte van de vloeren met naspanning bij een overspanning van 5 en 7 m beperkt is tot een minimum van 200 mm. De excentriciteit van de naspanstrengen t.o.v. de neutrale vezel zal, ter optimalisatie, echter onveranderd blijven. De naspanning heeft bij een overspanning van 5 m dan meer effect, omdat daar het buigmoment door de opgelegde belasting kleiner is. Figuur 17 en Figuur 18 geven het tracé van de strengen weer in de x-richting van de plaat. De figuren tonen aan dat de excentriciteit t.o.v. de onderkant van de plaat hetzelfde is bij platen met een overspanning van 5 en 7 m.



Figuur 17: Excentriciteit van de naspanstrengen t.o.v. onderkant vloerplaat bij een plaat met een overspanning van 5 m



Figuur 18: Excentriciteit van de naspanstrengen t.o.v. onderkant vloerplaat bij een plaat met een overspanning van 7 m

8. Economische vergelijking

8.1 Kostprijs platen op basis van actuele materiaalprijzen

De materiaalprijzen omvat beton, wapening en naspanning. De actuele prijs voor beton en wapening is vastgelegd op basis van offertes en kennis geleverd door Democo. Voor een betontype C30/37 wordt er gerekend met 127 €/m³.

Voor het betontype C35/45 wordt de prijs vastgelegd op 135 €/m³.

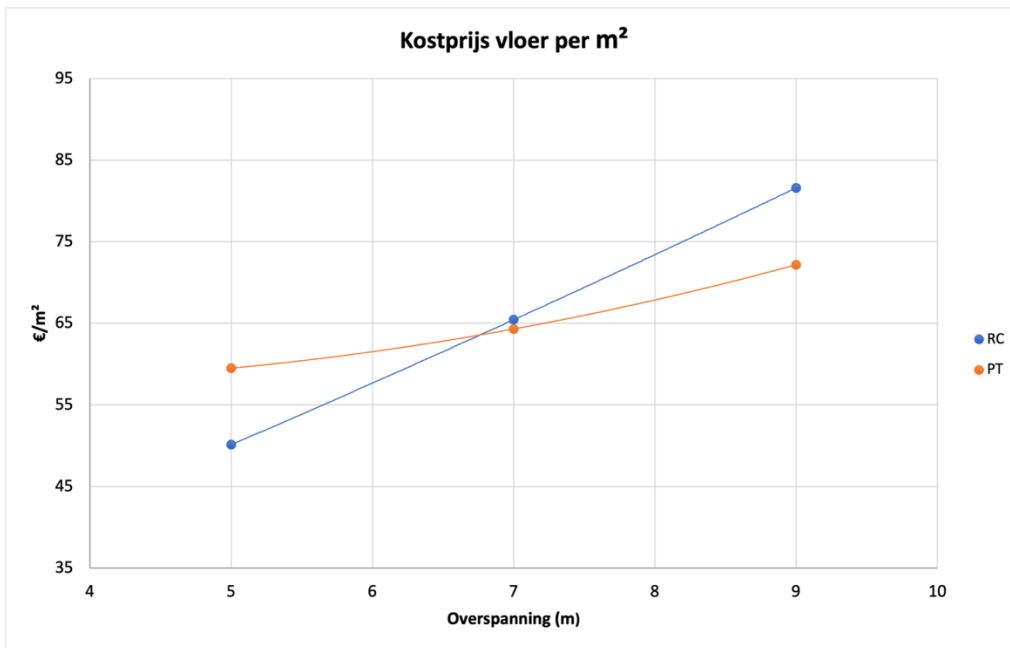
De wapeningprijs wordt aangenomen op 1,5 €/kg. Deze prijs is onderverdeeld in drie elementen, namelijk de prijs en levering van het staal, het gebruik van klein materieel en de arbeid voor het plaatsen van netten en staven. De totale kostprijs voor het naspannen van de vloer wordt vastgelegd op €80/m³. Dit is een richtwaarde aangezien er geen prijzen bekomen zijn bij aannemers die naspanning aanbieden. De prijs voor de bekisting wordt in deze vergelijking niet opgenomen.

Tabel 18 geeft een totaaloverzicht van de hoeveelheden van de verschillende soorten platen met de weergave van de actuele prijzen voor beton, wapening en naspanning. Deze tabel dient als basis voor het opmaken van de resultaten en wordt ook gebruikt in paragraaf 9. In deze paragrafen zullen de eenheidsprijzen van beton, wapening en naspanning aangepast worden naar de correcte eenheidsprijzen per situatie om zo tot de juiste grafieken en resultaten te komen. Tabel 18 is ook terug te vinden in bijlage G.

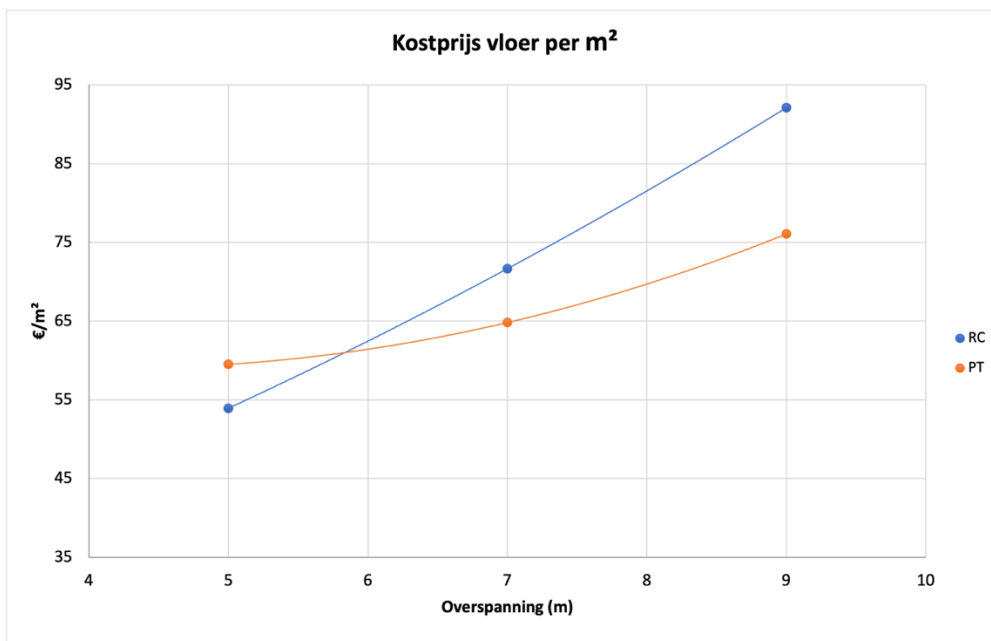
Economische vergelijking tussen een vlakke plaatvloer zonder naspanning en een vlakke plaatvloer met naspanning																			
Nummer	Type Vloer	Overspanning m	Belastingen		Dikte mm	Opp m ²	V beton m ³	Post Tension		Wapening		EH Prijs Beton €/m ³	Kostprijs beton €	EH prijs wapening €/kg	Kostprijs wapening €	EH prijs PT €/m ²	Kostprijs PT €	Totaal €	Totaal €/m ²
			Per. (kN/m ²)	Var. (kN/m ²)				kg	kg/m ²	kg	kg/m ²								
1	RC Flat Slab	5	3	3	190	100	19,576	/	/	1684	86	127	2486,152	1,5	2525	/	/	5011	50
2	RC Flat Slab	5	3	5	200	100	20,576	/	/	1853	90	127	2613,152	1,5	2780	/	/	5393	54
3	RC Flat Slab	7	3	3	250	196	49,8788	/	/	4327	87	127	6334,6076	1,5	6491	/	/	12826	65
4	RC Flat Slab	7	3	5	260	196	52,136	/	/	4949	95	127	6621,272	1,5	7423	/	/	14044	72
5	RC Flat Slab	9	3	3	300	324	100,4	/	/	9125	91	127	12750,8	1,5	13687	/	/	26438	82
6	RC Flat Slab	9	3	5	320	324	107,68	/	/	10778	100	127	13675,36	1,5	16167	/	/	29842	92
7	PT Flat Slab	5	3	3	200	100	20	235	2,35	1100	55	135	2700	1,5	1650	80	1600	5950	60
8	PT Flat Slab	5	3	5	200	100	20	235	2,35	1100	55	135	2700	1,5	1650	80	1600	5950	60
9	PT Flat Slab	7	3	3	200	196	40,145	857	4,37	2648	67	135	5419,575	1,5	3972	80	3211,6	12603	64
10	PT Flat Slab	7	3	5	200	196	40,55	857	4,37	2657	67	135	5474,25	1,5	3985,5	80	3244	12704	65
11	PT Flat Slab	9	3	3	220	324	74,88	1441	4,45	4856	67	135	10108,8	1,5	7284	80	5990,4	23383	72
12	PT Flat Slab	9	3	5	230	324	79,08	1441	4,45	5095	67	135	10675,8	1,5	7642,5	80	6326,4	24645	76

Tabel 18: Hoeveelheden en kostprijzen actuele situatie

Figuur 19 en Figuur 20 geven het verloop van de kostprijs weer bij respectievelijk een variabele belasting van 3 kN/m² en 5 kN/m². De y-as geeft de prijs per m² weer en de x-as de overspanning in m. De blauwe lijn op de grafieken geeft het verloop van de kostprijs van de vlakke plaatvloer traditioneel gewapend weer (RC), de oranje lijn op de grafieken geeft het verloop van de kostprijs van de vlakke plaatvloer met naspanning weer (PT).



Figuur 19: Kostprijs vloer a.d.h.v. actuele prijzen 2023 (VB 3 kN/m²)



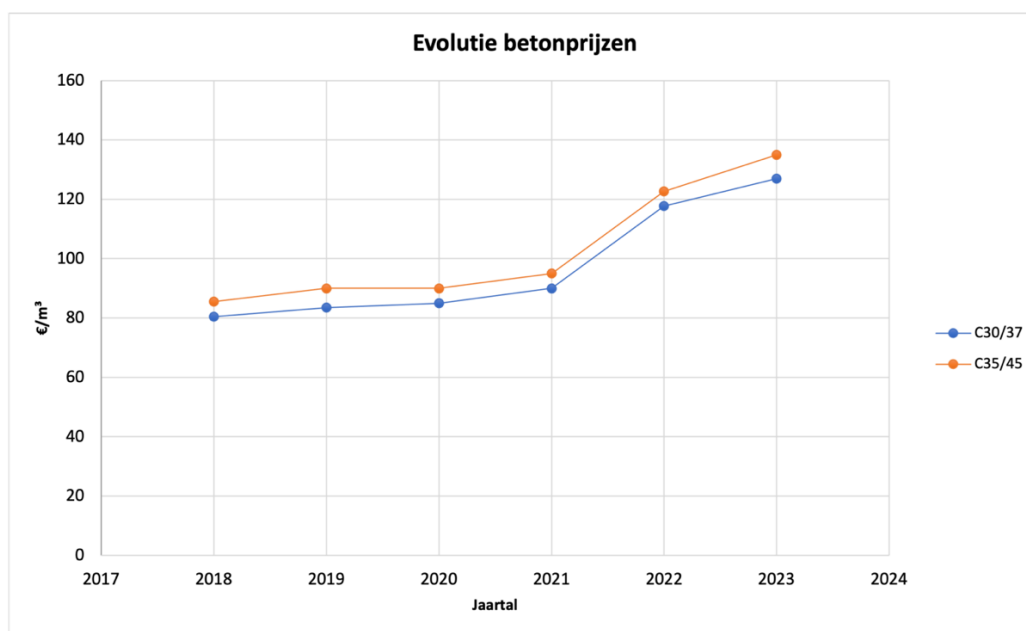
Figuur 20: Kostprijs vloer a.d.h.v. actuele prijzen 2023 (VB 5 kN/m²)

De literatuur [3] en de bedrijfswereld tonen aan dat het break-even point rond 7 m overspanning ligt, maar er wordt niet gespecificeerd bij welke belasting. In deze masterproef ligt het break-even point voor een variabele belasting van 3 kN/m² op 6,8 m overspanning en op 5,8 m bij een variabele belasting van 5 kN/m². De invloed van de belasting is een belangrijke factor voor het vastleggen van het break-even point. Bij een variabele belasting van 5 kN/m² wordt naspanning sneller interessant in vergelijking met een variabele belasting van 3 kN/m². Hieruit wordt er geconcludeerd dat naspanning een financieel interessante optie is bij zwaardere belastingen en grote overspanning.

8.2 Evolutie prijzen

De laatste jaren zijn de verschillende grondstofprijzen sterk toegenomen. Vooral de energiecrisis en de oorlog in Oekraïne liggen aan de basis van deze prijsstijgingen alsook de lonen die gestegen zijn door de inflatie die België⁶ en bij uitbreiding Europa kende.

De evolutie van de beton- en wapeningsprijzen wordt in deze paragraaf bekeken van 2018 tot en met 2023. In 2018 bedroeg de betonprijs (C30/37) 80,50 €/m³ terwijl de huidige betonprijs 127€/m³ bedraagt. Over de afgelopen vijf jaar gaat het om een prijsstijging van ongeveer 36%⁷ (Figuur 21).



Figuur 21: Evolutie betonprijzen

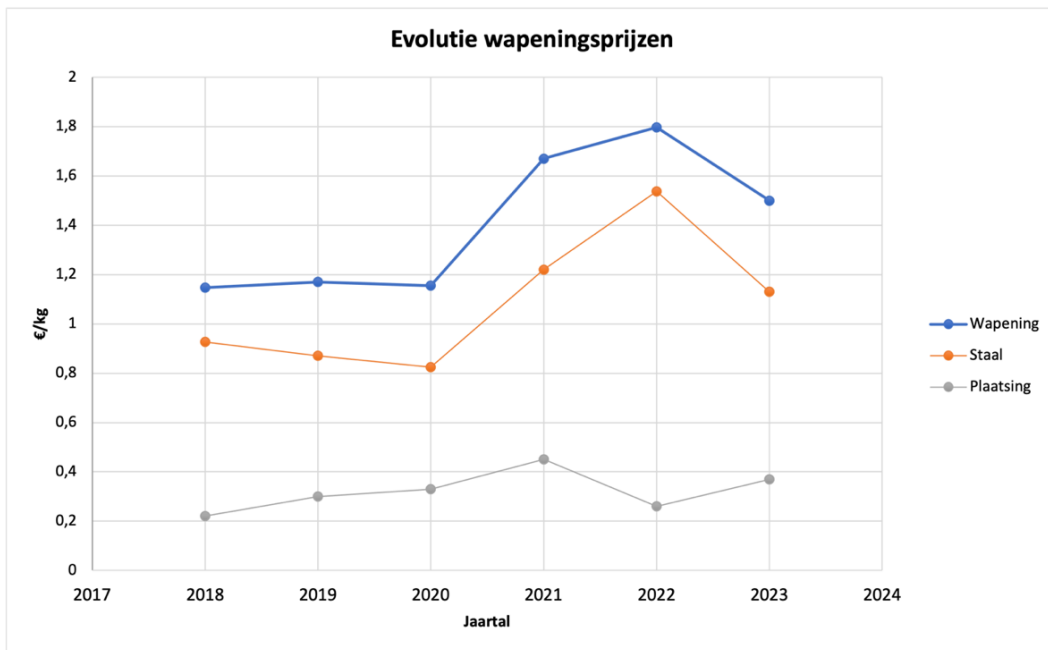
De evolutie van de wapeningsprijzen zijn vastgelegd in de GRYMAFAR-index van Belmetal⁸. De wapeningsprijs (wapeningsstaal en plaatsing) kent ook een stijgende evolutie sinds 2018 met een absoluut hoogtepunt in het jaar 2022. In 2018 bedroeg de wapeningsprijs 1,14 €/kg terwijl de huidige prijs 1,50 €/kg bedraagt. Het gaat om een stijging van ongeveer 23,50%⁹. Er wordt aangenomen dat de prijzen voor naspanning de afgelopen jaren dezelfde trend vertonen als de wapeningsprijzen waardoor er ook uit kan worden gegaan van een stijging van ongeveer 23,50% van de prijzen voor naspanning ten op zichte van 2018. De huidige prijs voor naspanning wordt vastgelegd op 80 €/m³ terwijl de prijs in 2018 61,2 €/m³ bedroeg (Figuur 22).

⁶ Inflatiecijfers van België zijn terug te vinden via www.vlaanderen.be of www.stat.nbb.be.

⁷ Deze gegevens zijn afkomstig uit offertes van betonprijzen tussen een periode van 2018 en 2023.

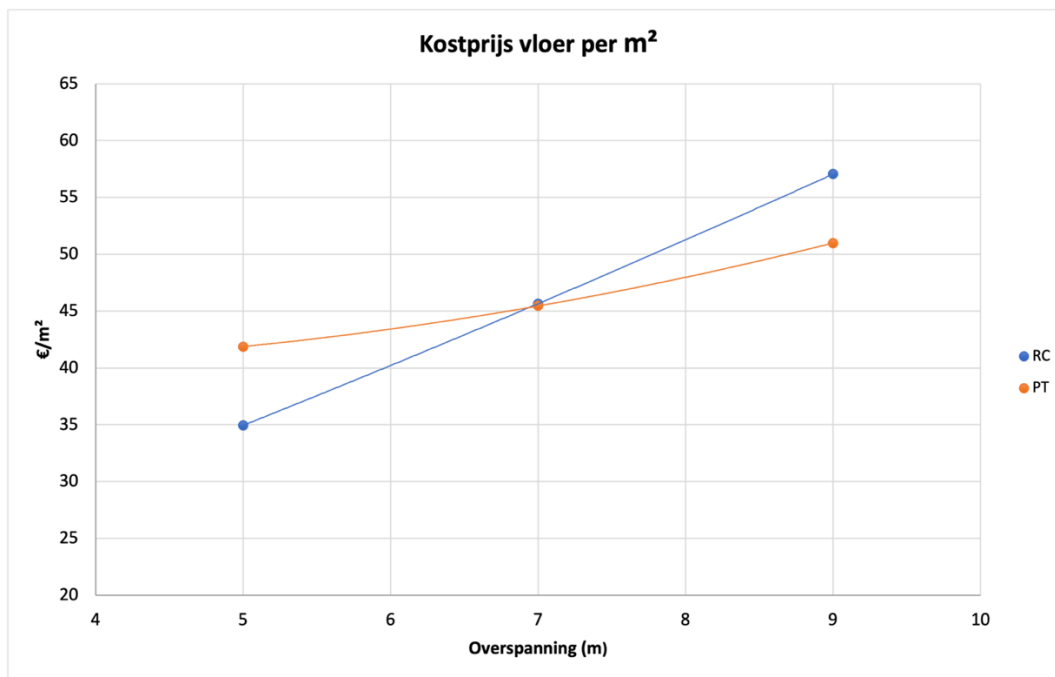
⁸ Betonstaalindex is terug te vinden op www.belmetal.be.

⁹ Deze gegevens zijn afkomstig uit offertes van wapeningsprijzen tussen een periode van 2018 en 2023.

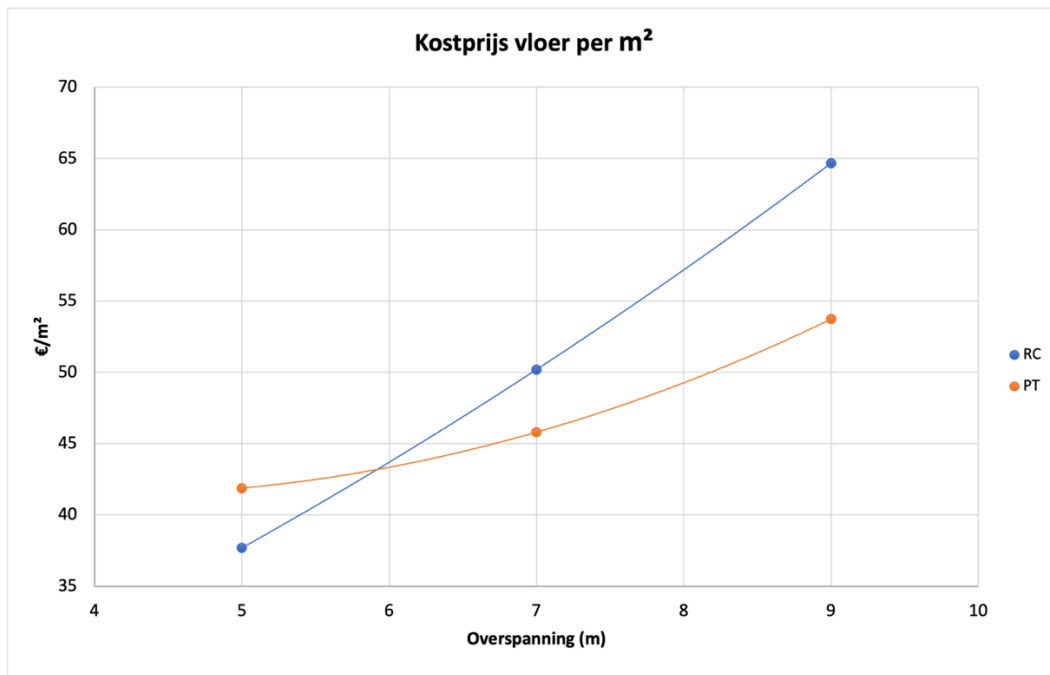


Figuur 22: Evolutie wapeningsprijs

8.3 Kostprijs platen op basis van materialenprijzen uit 2018



Figuur 23: Kostprijs van de platen a.d.h.v. materialenprijzen van 2018 (VB 3 kN/m²)



Figuur 24: Prijzen 2018 (VB 5 kN/m²)

Voor een variabele belasting van 3 kN/m² ligt het break-even point op 7 m overspanning (Figuur 23) en bij een variabele belasting van 5 kN/m² op 5,9 m overspanning (Figuur 24).

Wanneer de huidige prijzen vergeleken worden met de prijzen uit 2018, wordt er vastgesteld dat naspanning in 2023 sneller financieel interessant is geworden om toe te passen omdat het break-even point naar links is verschoven ten opzichte van vijf jaar geleden.

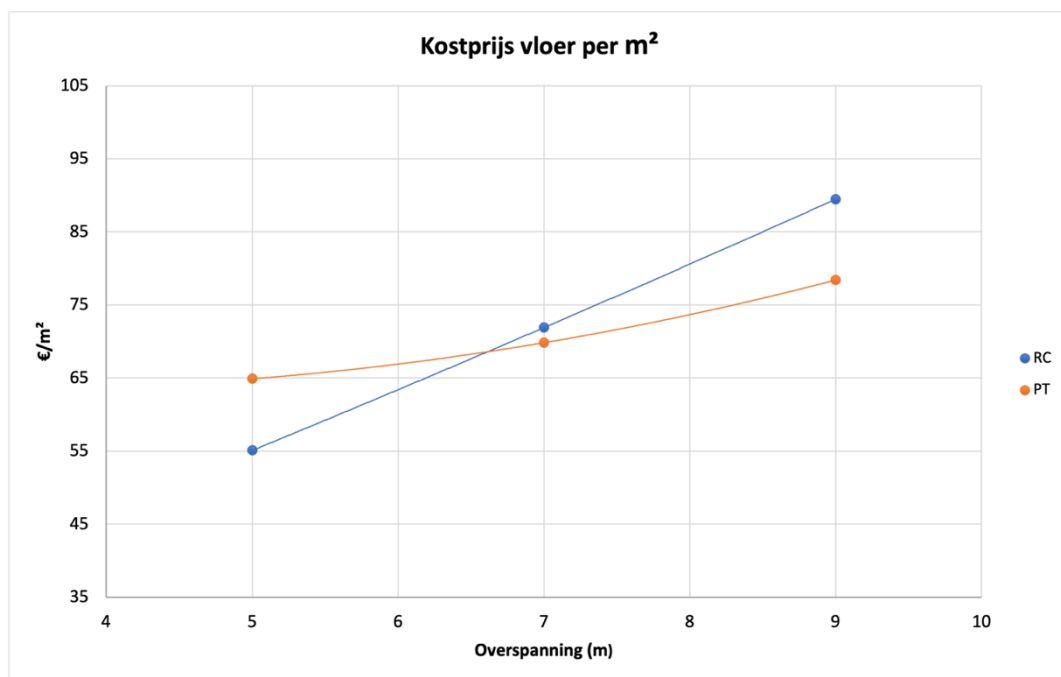
Belangrijk om te vermelden is dat het verschil hiertussen echter klein is en het gebruik van naspanning daarom vijf jaar geleden ook al een interessante optie was. Indien geen externe factoren in rekening worden gebracht, wordt er verwacht dat naspanning in de toekomst dezelfde trend volgt als de afgelopen vijf jaar.

9. Externe factoren die keuze voor vloerplaat met naspanning beïnvloeden

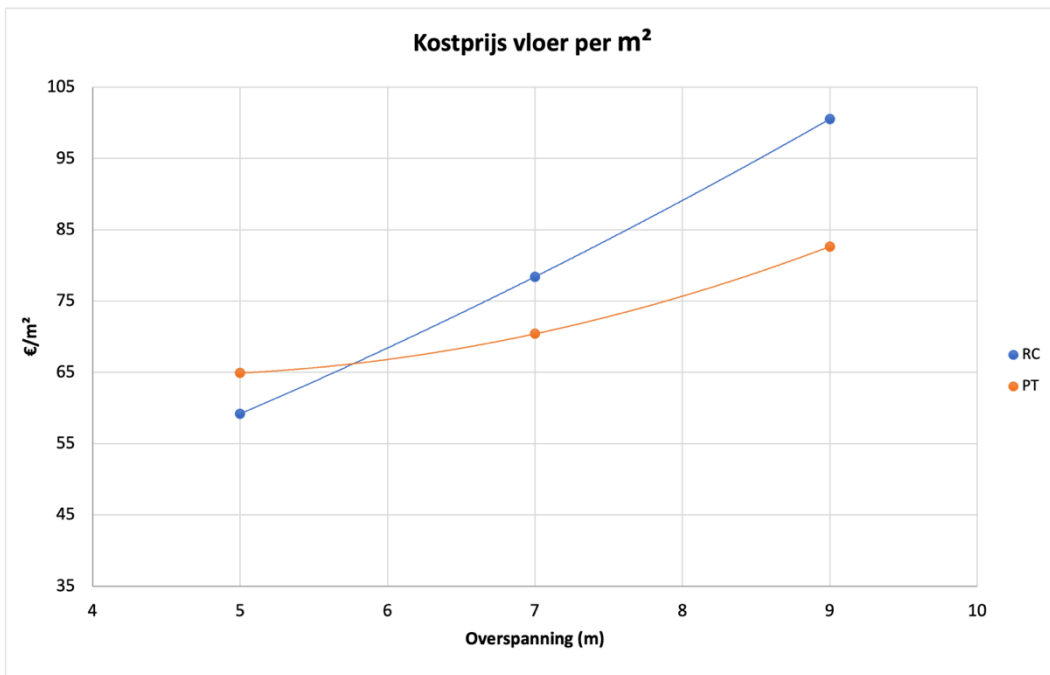
De keuze voor een vlakke vloerplaat uitgevoerd met naspanning is afhankelijk van verschillende factoren. Enerzijds spelen financiële factoren (materiaalprijzen) een rol, anderzijds kan de bouwheer of architect verschillende eisen stellen aan het gebouw die betrekking hebben op duurzaamheid, structurele efficiëntie, esthetiek, etc. Om aan te tonen wat het effect is van de materiaalprijzen op de kosteneffectiviteit van naspanning, worden er enkele situaties vooropgesteld waarbij de prijzen van beton, wapening en naspanning toe- of afnemen met 20%. Dit is een aanname om het effect van de materiaalprijzen duidelijk zichtbaar te maken in de grafieken en er een conclusie over te vormen. De prijzen waarop een toe- of afname is toegepast worden vergeleken met de huidige prijzen uit paragraaf 8.1. Aangezien er voor naspanning ook staal nodig, wordt er van uit gegaan dat de prijs van wapening en naspanning samen stijgt of daalt.

9.1 Materiaalprijzen

9.1.1 Stijging van de betonprijs met 20%



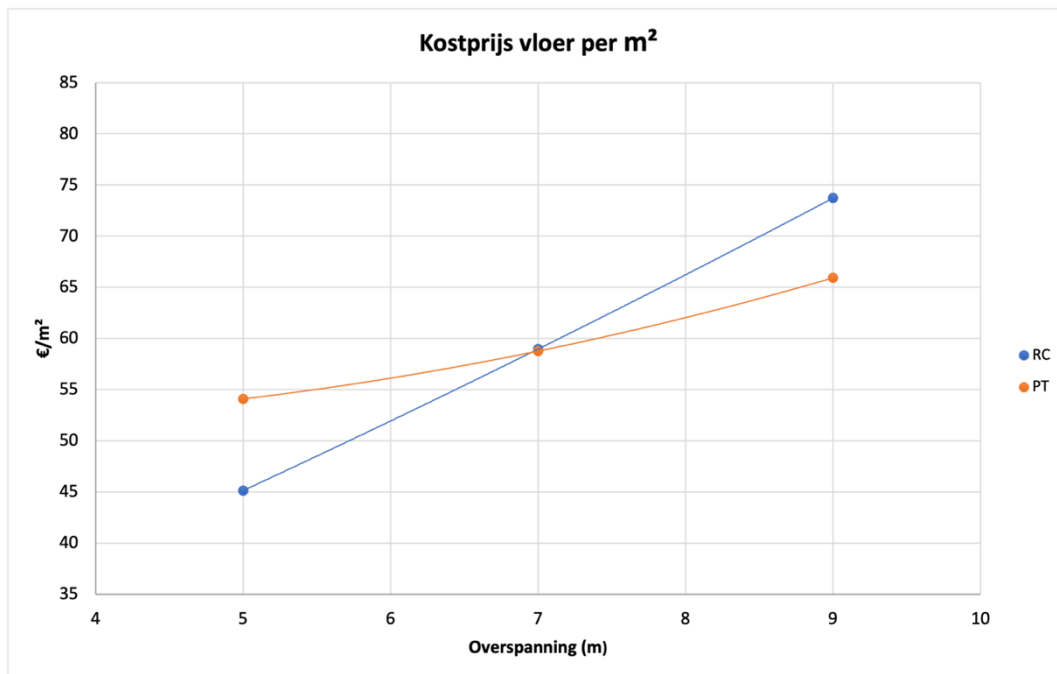
Figuur 25: Betonprijzen +20% (VB 3 kN/m²)



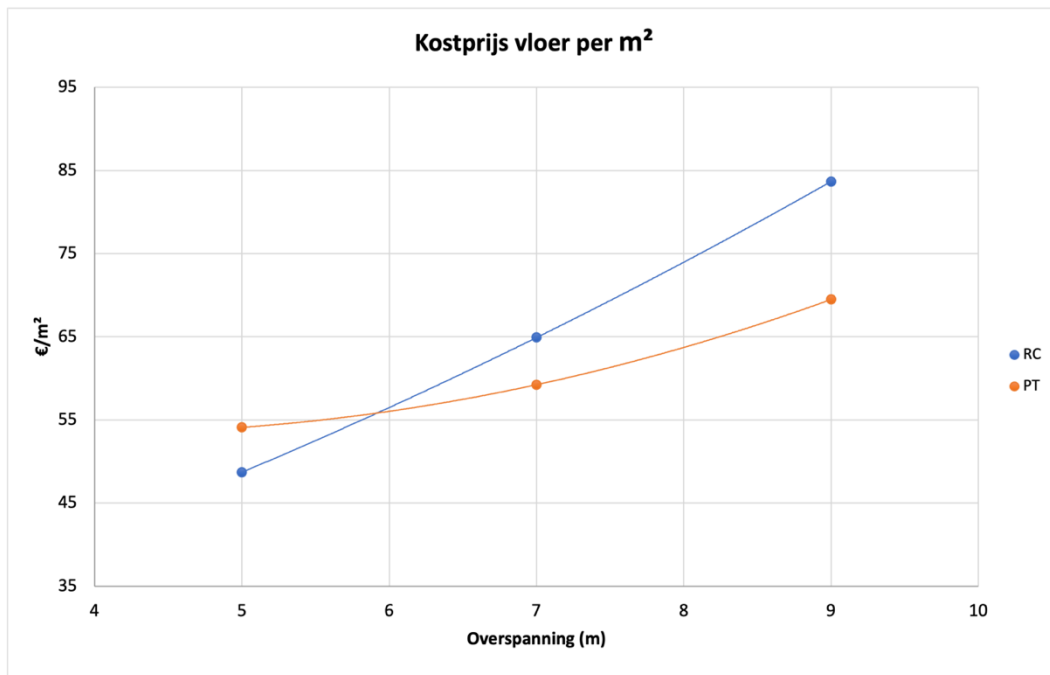
Figuur 26: Betonprijzen +20% (VB 5 kN/m²)

Voor een variabele belasting van 3 kN/m² ligt het break-even point op 6,7 m overspanning (Figuur 25) en bij een variabele belasting van 5 kN/m² op 5,8 m overspanning (Figuur 26).

9.1.2 Daling van de betonprijs met 20%



Figuur 27: Betonprijzen -20% (VB 3 kN/m²)

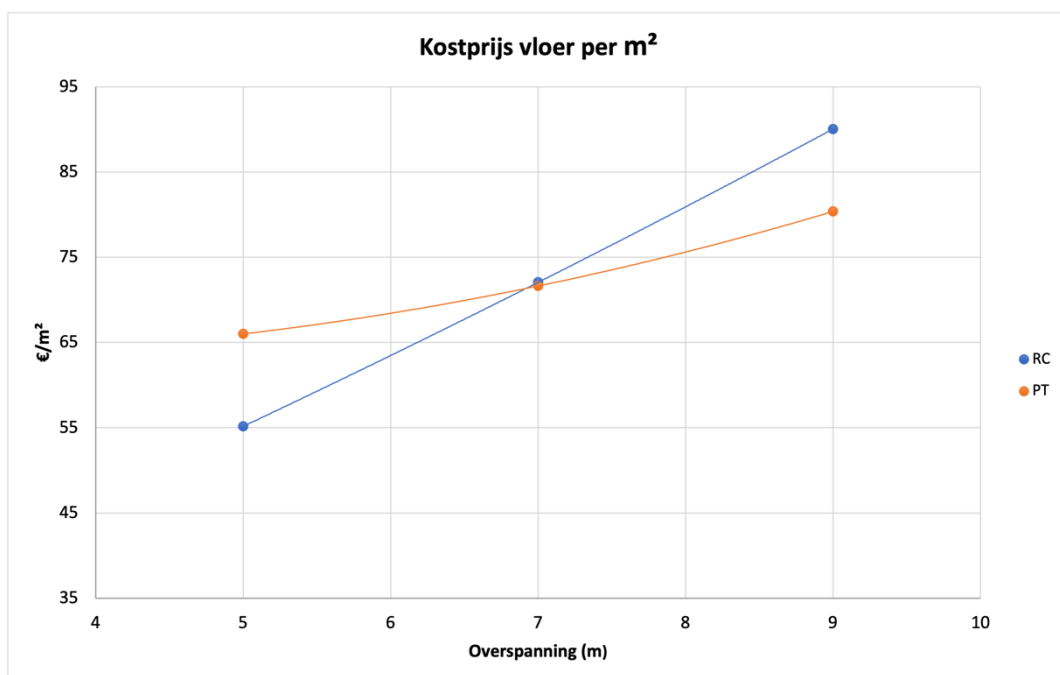


Figuur 28: Betonprijzen -20% (VB 5 kN/m²)

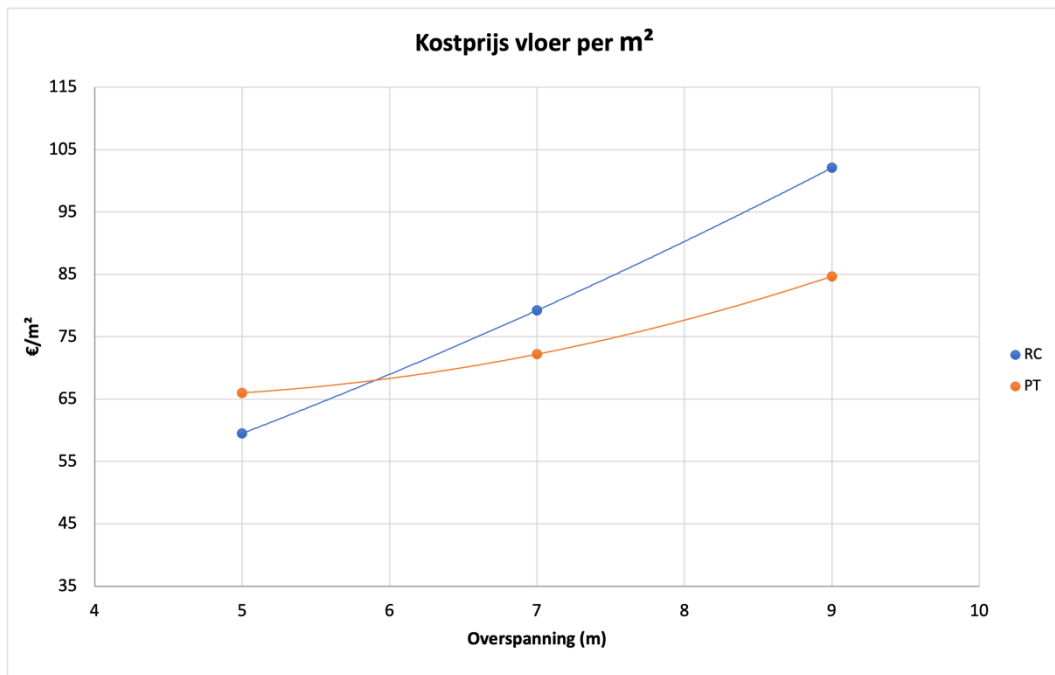
Voor een variabele belasting van 3 kN/m² ligt het break-even point op 7 m overspanning (Figuur 27) en bij een variabele belasting van 5 kN/m² point op 5,9 m overspanning (Figuur 28).

Een toename in de betonprijs van 20% zorgt ervoor dat een vloer met naspanning sneller interessant wordt. Een afname van de betonprijs met 20% zorgt ervoor dat een vloer met naspanning minder snel interessant wordt.

9.1.3 Stijging van de wapeningsprijs en PT prijs met 20%



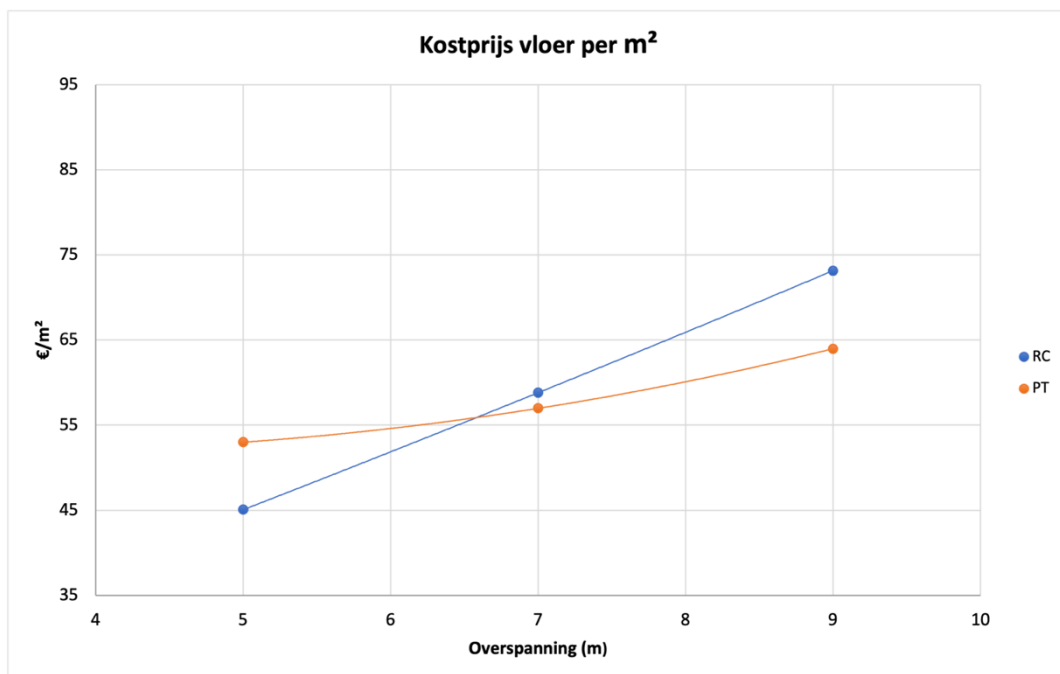
Figuur 29: Wapeningsprijs en PT prijs +20% (VB 3 kN/m²)



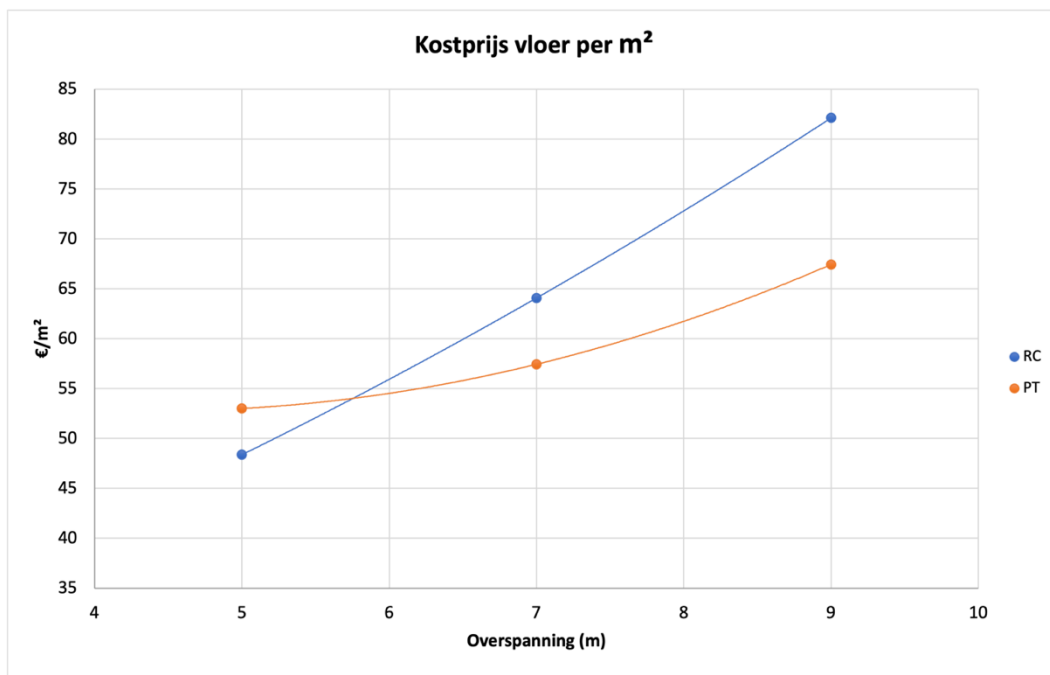
Figuur 30: Wapeningsprijs en PT prijs +20% (VB 5 kN/m²)

Voor een variabele belasting van 3 kN/m² ligt het break-even point op 7 m overspanning (Figuur 29) en bij een variabele belasting van 5 kN/m² point op 5,9 m overspanning (Figuur 30).

9.1.4 Daling van de wapeningsprijs en PT prijs met 20%



Figuur 31: Wapeningsprijs en PT prijs -20% (VB 3 kN/m²)



Figuur 32: Wapeningsprijs en PT prijs -20% (VB 5 kN/m²)

Voor een variabele belasting van 3 kN/m² ligt het break-even point op 6,5 m overspanning (Figuur 31) en bij een variabele belasting van 5 kN/m² op 5,8 m overspanning (Figuur 32).

Een toename in de wapeningsprijs en PT prijs van 20% zorgt ervoor dat een vloer met naspanning minder snel interessant wordt. Een afname van de wapeningsprijs en PT prijs met 20% zorgt ervoor dat een vloer met naspanning sneller interessant wordt.

9.2 Bekisting

In termen van bekisting zijn er bij het gebruik van naspanning een aantal zaken die veranderen ten opzichte van traditioneel gewapende vloeren. Dit wordt aangetoond aan de hand van een voorbeeld, waarbij er voor drie situaties een planning wordt gemaakt om te bepalen hoe lang er bekist wordt en hoe lang er wordt doorgestempeld. Er wordt een planning gemaakt voor een traditioneel gewapende vloer met een betonsterkteklasse van C30/37, voor een nagespannen vloer met een betonsterkteklasse van C35/45 en voor een nagespannen vloer met een betonsterkteklasse van C50/60 (bijlage H-J). De laatste twee situaties worden vergeleken om het effect van het gebruik van een hogere betonklasse in kaart te brengen. Er is gekozen voor een gebouw van vijf verdiepen waarvan de vloerplaten 30x30 m groot zijn. De dikte van de platen komt overeen met plaat 4 en plaat 10, voor de traditioneel gewapende vloer en de nagespannen vloeren respectievelijk.

Allereerst dient er opgemerkt te worden dat bij het aanspannen van nagespannen vloeren voldoende werkruimte moet gegarandeerd worden, waardoor er aan de omtrek van de plaat minstens 70 cm extra bekisting wordt voorzien. In oppervlakte gaat dat in dit voorbeeld over een vermeerdering van bijna 10%.

In de drie situaties valt er op dat de betonstort voor alle verdiepen steeds gelijktijdig gebeurt omdat dit afhangt van wat er zich voorafgaandelijk afspeelt. Kolommen, wanden en kernen moeten er staan vooraleer er gestart wordt met het plaatsen van de bekisting. Nadat de bekisting is opgesteld, wordt de wapening geplaatst. De termijn die daarvoor wordt ingepland is in beide gevallen (traditioneel gewapend en naspanning) gelijk. Bij traditioneel gewapende vloeren is er zwaardere (bijleg-)wapening nodig, terwijl er bij naspanning in die termijn ook het leggen van de kanalen wordt gerekend.

Er is echter vooral een verschil te merken in ontkistingstijd en doorstempeling. Bij de traditioneel gewapende vloer wordt er ontkist na zeven dagen, wanneer het beton ongeveer een sterkte heeft van 15 MPa. De vloeren moeten na het ontkisten steeds worden ondersteund door stempels en er worden twee verdiepen doorgestempeld. Opvallend is dat het eerste verdiep van de nagespannen vloer met een betonsterkteklasse van C35/45 pas zes dagen later ontkist wordt. De reden daarvoor is dat de vloer eerst aangespannen moet worden en dat is pas mogelijk wanneer het beton een sterkte heeft van 30 MPa. Voor C35/45 is dat na 13 dagen. Wanneer echter de vloer aangespannen is heeft hij reeds een aanzienlijke sterkte en daardoor moet er steeds maar één verdiep worden doorgestempeld.

Bij de nagespannen vloer met een betonsterkteklasse van C50/60 kan de bekisting van de eerste verdieping een dag eerder worden weggehaald in vergelijking met de traditioneel gewapende vloer. Het beton heeft in dat geval al na zes dagen een sterkte van 30 MPa. Vanaf dan kan er worden aangespannen en ontkist.

Bij nagespannen vloeren is het niet nodig om de dakplaat nog te onderstempelen. Vanaf er aangespannen en ontkist is, heeft de vloer voldoende autonome sterkte.

De kostprijs van de bekisting is het laagst bij de traditioneel gewapende plaat (Tabel 19), aangezien de oppervlakte minder groot is dan bij de nagespannen vloeren en omdat de totale huurtermijn maar één dag langer is dan bij de nagespannen vloer met een betonsterkteklasse van C50/60. Er kan ook worden geconcludeerd dat de kostprijs van de bekisting het hoogst is bij een aangespannen vloerplaat met betonsterkteklasse C35/45 omdat de ontkistingstermijn afhankelijk is van wanneer er aangespannen kan worden (in dit geval pas na 13 dagen).

Bekisting	€/m ² /maand	€/m ² /dag	m ² dagen	Totaalprijs
RC C30/37	20,00 €	0,67 €	104400	69.600,00 €
PT C35/45	20,00 €	0,67 €	126208	84.138,67 €
PT C50/60	20,00 €	0,67 €	112404	74.936,00 €

Tabel 19: Kostprijs bekisting

De kostprijs voor de doorstempeling is bij de traditioneel gewapende vloer het hoogst, omdat de huurtermijn langer is. In absolute kostprijs is dit geen groot verschil, maar naar planning toe heeft dit wel gevolgen omdat bijvoorbeeld de start van het buitenschrijnwerk hierdoor pas later kan gebeuren. De huurtermijn voor de nagespannen platen is identiek (Tabel 20).

Doorstempeling	€/st/dag	st.dagen	Totaalprijs
RC C30/37	0,12 €	14960	1.795,20 €
PT C35/45	0,12 €	9240	1.108,80 €
PT C50/60	0,12 €	9240	1.108,80 €

Tabel 20: Kostprijs doorstempeling

Wanneer er dus enkel bekisting en doorstempeling in acht worden genomen, is de traditioneel gewapende plaat de goedkoopste oplossing. Er dient echter rekening gehouden te worden met het verschil in eenheidsprijs van de verschillende betonsterkteklassen en de hoeveelheid beton die nodig is voor de vloer. Wanneer die kosten mee in rekening worden gebracht, worden de nagespannen vloeren financieel de meest interessante oplossing (Tabel 21). Opvallend is dat de totaalprijs van beide nagespannen vloeren bijna identiek is.

	Tot. prijs beton	Tot. prijs bekisting	Tot. prijs stempeling	Totaalprijs
RC C30/37	148.590,00 €	69.600,00 €	1.795,20 €	219.985,20 €
PT C35/45	121.500,00 €	84.138,67 €	1.108,80 €	206.747,47 €
PT C50/60	130.500,00 €	74.936,00 €	1.108,80 €	206.544,80 €

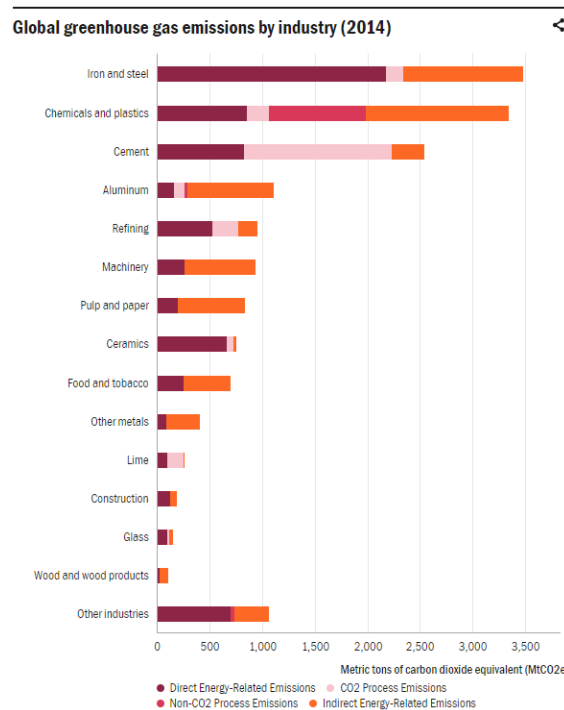
Tabel 21: Totaalprijs beton, bekisting en doorstempeling

Ook de kostprijs van de wapening en de naspanning moet nog in rekening worden gebracht. Uit Tabel 18 van paragraaf 8.1 blijkt dat kostprijs voor de wapening van plaat 4 €7423 bedraagt, terwijl voor plaat 10 – een plaat met betonsterkteklasse C35/45 – de kostprijs voor wapening en naspanning totaal €7229,5 is. Deze prijs ligt in dezelfde lijn. Wanneer echter een betonklasse C50/60 wordt gebruikt zal er nog minder wapening nodig zijn, wat de kost van wapening en naspanning nog verder doet dalen. Financieel gezien zal een nagespannen vloerplaat met een betonsterkteklasse van C50/60 dus de meest interessante oplossing zijn, wanneer bekisting, doorstempeling, beton, wapening en naspanning in rekening worden gebracht.

De plannings werden opgesteld op basis van kalenderdagen. Mogelijk heeft het toepassen van werkdagen effect op de totale prijzen.

9.3 Duurzaamheid

In tijden waar veel belang wordt gehecht aan energie-efficiëntie en vermindering van CO₂-uitstoot kan naspanning een oplossing bieden. De productieprocessen van staal en cement zijn zeer energie-intensief. Cement, als hoofdbestanddeel van beton, is wereldwijd een van de meest verbruikte hulpbronnen, na water. Naar schatting wordt wereldwijd jaarlijks ongeveer 3 ton cement per persoon gebruikt. Voor productie van staal en cement is een voortdurende toevoer van hitte nodig, waarvoor een grote energiebron nodig is, die vaak voor een groot deel afhankelijk is van fossiele brandstoffen. Bovendien dragen de chemische processen die inherent zijn aan het productieproces van deze materialen aanzienlijk bij tot de uitstoot. Algemeen wordt er erkend dat de staal- en cementproductie samen goed zijn voor iets meer dan 50% van de totale industriële emissies [19]. Figuur 33 geeft weer wat het uitstoot-aandeel van cement en staal is in 2014.



Figuur 33: Global greenhouse gas emissions by industry (2014) [19]

Door het gebruik van naspanning is er minder verbruik van beton en wapening. Uit de resultaten van deze masterproef blijkt, zoals reeds aangehaald in paragraaf 7, dat de besparing op materiaal groter wordt naarmate de overspanning groter is en naarmate de belasting op de plaat groter is. Bij een overspanning van 9 meter en een variabele belasting van 5 kN/m² wordt er 28,1% bespaard op beton en 33,1% op wapening. Uit bevindingen van [20] blijkt dat dit voor een overspanning van 13,33 m zelfs oploopt tot respectievelijk 37% en 43,4%. Die materiaalvermindering zou aanleiding geven tot een besparing van 28,8% tot 40,9% in aardopwarmingspotentieel.

Bijkomend zijn er door de vermindering van beton en wapening minder vrachten van de betoncentrale naar de werf nodig, wat op zijn beurt zorgt voor een lagere uitstoot.

Het moet echter wel worden opgemerkt dat gebruik van hogere betonsterkteklassen leidt tot hogere CO₂-uitstoot dan bij lagere betonsterkteklassen, vanwege de extra warmte die vrij komt bij de productie. Bij naspanning wordt minimaal betontype C35/45 gebruikt, omdat het beton minstens een druksterkte van 30 MPa nodig heeft om het op spanning te zetten [6]. Vaak worden in de praktijk nog hogere betonsterkteklassen gebruikt om de druksterkte van 30 MPa sneller te bereiken en zo de bouwtijd aanzienlijk te verminderen. Deze hogere betonsterkteklassen vereisen cementklassen zoals CEM I, die een groot aandeel portlandklinker bevatten, waardoor het beton een hoge aanvangssterkte en eindsterkte heeft [21]. Het productieproces van portlandklinker is echter zeer energie-intensief.

9.4 Brandweerstand

Het gebruik van naspanning leidt tot een verminderde scheurvorming en bovendien is de scheurwijdte van de optredende scheuren kleiner. Dit zorgt ervoor dat de wapening beter wordt beschermd tegen brand. Wanneer echter de temperatuur stijgt tot boven 150°C, verliezen de naspanningsstrengen sneller hun sterkte dan standaard staafwapening. Om die reden wordt er bij nagespannen vloerplaten vaak een grotere betondekking voorzien [6].

9.5 Andere randvoorwaarden

In Tabel 22 staan de belangrijkste ontwerpdoelen opgesomd en welk effect naspanning er op heeft [6].

Doel	Effect van naspanning
Ontwerpfase	
Ontwerp PT plaat	Neemt iets meer tijd in beslag
Minimale structurele plaatdikte	Maakt grotere slankheid (l/d) mogelijk
Kolomvrije ruimte	Grotere overspanningen mogelijk zonder overmatig eigengewicht
Kleinere kolomafmetingen	Laag eigengewicht van vloer vermindert momenten op de kolommen
Laag eigengewicht van de vloer	Lagere dikte van de plaat, met minder wapening
Financieel	Interessant vanaf 7 m bij weinig belasting en vanaf 6 m bij grotere belastingen
Lage constructietijd	Mogelijk sneller dan traditioneel gewapende platen
Uitstoot	Positieve impact op uitstoot door minder materiaalverbruik
Bouwfase	
Bekisting	Vlakke vloerplaten zonder kolomkop, dus bekisting makkelijker realiseerbaar Sneller ontkisten
Betontype	Minstens C35/45 Hogere klassen zoals C50/60 zijn ook gebruikelijk om sneller te kunnen aanspannen en ontkisten, maar hogere kostprijs
Snelle assemblage van staal	Minimum traditionele wapening nodig Strengen hebben lange lengte dus hoog rendement
Snel betonneren	Minder beton nodig
Minimum doorstempeling	Vloer is zelfdragend op jonge leeftijd
Uitvoering naspanning	Gebeurt door gespecialiseerde bedrijven

Gebruiksfase	
Beperkte doorbuiging	Opbuigend effect door geprofileerd tracé van de kanalen
Weinig onderhoud	Minimale scheurvorming, trage degeneratie
Brandveiligheid	Verbetering door minimale scheurvorming Grotere betondekking nodig
Kleine openingen	Grotere afstand tussen staal dan in traditioneel gewapende vloerplaten
Grote openingen	Aandacht nodig bij ontwerp door gespecialiseerde bedrijven
Toekomstige renovaties	Grotere verdiepingshoogte en vlakke vloerplaten geven maximale flexibiliteit bij renovaties
Afbraak	Afbraakstudie moet worden uitgevoerd door specialisten

Tabel 22: Externe factoren die keuze voor vloeren met naspanning beïnvloeden

10. Conclusie

Voor het ontwerpen van een vlakke plaatvloer met lokale verdikkingen zijn er veel opties en moet er rekening gehouden worden met verschillende parameters. Dit bemoeilijkt het proces om een optimale situatie in het kader van materiaalgebruik te creëren. Bovendien, is de keuze van de vloerplaat steeds onderhevig aan de beslissingen van o.a. de bouwheer en architect inzake het aantal en type vast te leggen parameters.

In verband met de huidige prijzen voor beton, wapening en naspanning kunnen er een aantal besluiten gevormd worden. Uit de resultaten van deze masterproef blijkt dat het break-even point op een overspanning van 6,8 m zich bevindt bij een variabele belasting van 3 kN/m^2 , terwijl dit op een overspanning van 5,8 m bij een variabele belasting van 5 kN/m^2 ligt. Hieruit volgt dat het break-even point bij hogere belastingen lager komt te liggen, wat wijst op het feit dat naspanning financieel rendabel is bij zwaardere gebruiksbelastingen en grotere overspanningen. Verder, wordt er vastgesteld dat naarmate de overspanning vergroot, ook het procentueel prijsverschil per m^2 tussen een traditioneel gewapende vloerplaat en een vloerplaat met naspanning exponentieel stijgt. Belangrijk om hierbij op te merken is dat er bij naspanning, voor een overspanning van 5 m, geen reductie in beton mogelijk is in verband met de obligatoire minimale vloerdikte van 20 cm. Tot gevolg, zal de kostprijs van naspanning hard doorwegen op de totale kostprijs van de plaat.

Na een grondige vergelijking van de actuele cijfers inzake de desbetreffende materiaalprijzen met deze uit 2018, wordt er geconcludeerd dat naspanning op dit moment economisch even rendabel is als vijf jaar geleden. Aanvullend, werd er vastgesteld dat de materiaalprijzen een geringe invloed hebben op de overspanning omdat het break-even point bij benadering maar stijgt of daalt met 0,5 m.

Afgezien van de materiaalgerelateerde parameters, dient er bij het ontwerpen van een vlakke plaatvloer rekening gehouden te worden met veel externe factoren die telkens project- en situatieafhankelijk zijn. Elk project dient afzonderlijk bestudeerd te worden om na te gaan of naspanning al dan niet economisch interessant is. Het is dus belangrijk om op te merken dat de resultaten van deze masterproef niet gegeneraliseerd mogen worden. Ze geven enkel een algemene en praktische richtlijn voor de betrokken partijen die het gebruik van naspanning uitdrukkelijk overwegen.

Allereerst, kan het nagaan van de invloed van naspanning op de volledige ponsberekening een implicatie zijn voor verder onderzoek aangezien vloeren met naspanning in theorie beter bestand zijn tegen ponskrachten terwijl ze een geringere dikte kenmerken. Ten tweede, kan dit onderzoeksmodel opnieuw ingezet worden waarbij de lokale verdikkingen vervangen worden door ponswapening. Tot slot, kunnen alle verschillende parameters voor het ontwerp van vloeren verder individueel onderzocht worden om hun invloed op naspanning in kaart te brengen.

Bibliografie

- [1] Post-tensioning manual, Glenview: Post-tensioning institute, 1976.
- [2] P. Baekeland, Cursus EC2 - Hoofdstuk 15 - Spanbeton.
- [3] S. N. Bousias, L. Fillo, S. A. Haugerud, T. Ichihashi, M. Kalny, S. Perez-Fadon, K.-H. Reineck, J. Rissanen en H. Shiratani, Post-tensioning in buildings, International Federation for Structural Concrete (FIB), 2005.
- [4] „Prestressed concrete,” [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Prestressed_concrete. [Geopend 14 Februari 2023].
- [5] „Voorgespannen beton,” [Online]. Available: https://www.joostdevree.nl/shtmls/voorgespannen_beton.shtml. [Geopend 21 Maart 2023].
- [6] S. Khan en M. Williams, Post-tensioned Concrete Floors, Butterworth Heinemann, 1995.
- [7] R. Whittle, P. Bottomley, J. Clarke, H. Jones, T. Jones, P. Matthew, J. Paterson en A. Truby, Post-tensioned concrete floors: Design handbook, The Concrete Society, 2005.
- [8] S. Vanteddu en J. Mohit, *Comparison of RCC and Post-Tensioned Flat Slabs Using ETABS*, IOP Publishing Ltd, 2022.
- [9] *Structural use of concrete - Part 1: Code of practice for design and construction*, 1997.
- [10] „What is post-tension,” Interspan, [Online]. Available: <https://www.interspan.global/why-interspan/post-tensioned-concrete/>. [Geopend 12 Maart 2023].
- [11] J.-F. Denoël, „Hoe ontwerpen en berekenen met Eurocode 2,” Febelcem, Brussel, 2017.
- [12] „Eurocode 0 - Grondslag voor het constructief ontwerp - Nationale Bijlage,” NBN EN 1990 ANB. [Online]. Available: <https://www.nbn.be/>.
- [13] „Eurocode 1 - Belastingen op constructies - Deel 1-1 : Algemene belastingen - Dichtheden, eigen gewicht en opgelegde belastingen voor gebouwen,” NBN EN 1991-1-1. [Online]. Available: <https://www.nbn.be/>.
- [14] „Eurocode 1 - Belastingen op constructies - Deel 1-1: Algemene belastingen - Volumieke gewichten, eigengewicht en opgelegde belastingen voor gebouwen,” NBN EN 1991-1-1 ANB. [Online]. Available: <https://www.nbn.be/>.
- [15] „Eurocode - Grondslagen van het constructief ontwerp,” NBN EN 1990. [Online]. Available: <https://www.nbn.be/>.
- [16] J.-F. Denoël, „Compendium Eurocode 2,” Febelcem, Brussel, 2017.
- [17] „Eurocode 2: Ontwerp en berekening van betonconstructies - Deel 1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen,” NBN EN 1992-1-1. [Online]. Available: <https://www.nbn.be/>.
- [18] „Eurocode 2: Ontwerp en berekening van betonconstructies - Deel 1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen,” NBN EN 1992-1-1 ANB. [Online]. Available: <https://www.nbn.be/>.
- [19] R. Ghoneim, G. Mete en A. Hopley, „Steel and cement can drive the decade of action on climate change. This is how,” Industrial Analytics Platform, Mei 2022. [Online]. Available: <https://iap.unido.org/articles/steel-and-cement-can-drive-decade-action-climate-change-how#fn-1383-0>. [Geopend 7 Mei 2023].

- [20] D. Miller, J. Doh, H. Guan, M. Mulvey, S. Fragomeni, T. McCarthy en T. Peters, *Environmental Impact Assessment of Post Tensioned and Reinforced Concrete Slab Construction*, Australië, 2012.
- [21] „Portlandcement,” [Online]. Available: <https://www.joostdevree.nl/shtmls/portlandcement.shtml#:~:text=Portlandcement%20is%20een%20sterk%20hydraulisch,ontkisten%20of%20voorspannen%20noodzakelijk%20is>. [Geopend 11 Mei 2023].
- [22] „Aanvangssterkte,” [Online]. [Geopend 23 Maart 2023].

Bijlagen

Bijlage A: Afleiding optimale nuttige hoogte (d_{opt})

De keuze voor de optimale nuttige hoogte, die verschillend is van de meest economische hoogte, heeft betrekking op optimaal materiaalgebruik van beton en staal. De optimale nuttige hoogte garandeert voldoende rotatiecapaciteit en ductiliteit. Deze hoogte stemt overeen met een betonstuik ϵ_c van 3,5‰ en een betonrek ϵ_s van 10‰. Voor verdere toelichting over de optimale nuttige hoogte wordt verwezen naar cursus P.Baekeland.

De formule voor het gereduceerd buigmoment μ_d is gedefinieerd als:

$$\mu_d = \frac{M_{sd}}{b * d^2 * f_{cd}}$$

Daarna wordt de functie van μ_d omgevormd zodat alles in functie van d staat.

$$d^2 = \frac{M_{sd}}{b * \mu_d * f_{cd}}$$

Waarbij:

$$b = 1000 \text{ mm}$$

$$\mu_d = 0,187$$

$$f_{cd} = \frac{0,85 * f_{cd}}{1,50}$$

Bovenstaande waarden worden ingevuld in onderstaande formule.

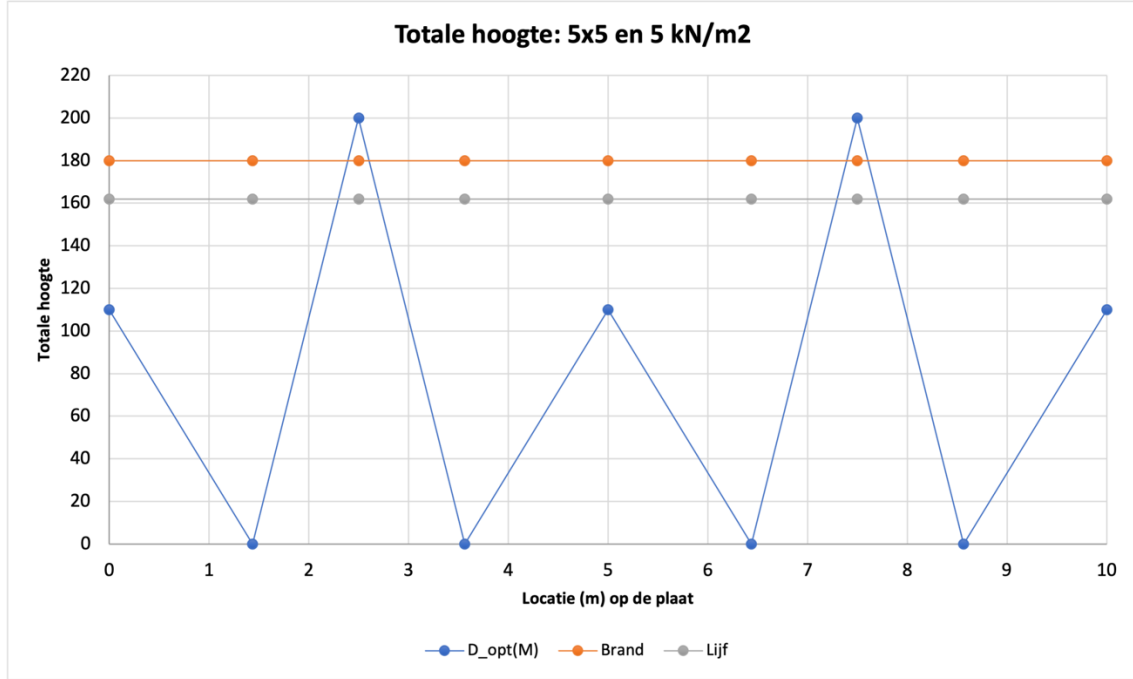
$$d = \sqrt{\frac{M_{sd}}{1000 * 0,187 * \frac{0,85 * f_{cd}}{1,50}}}$$

Deze formule wordt verder uitgewerkt waardoor onderstaande uitdrukking van d_{opt} bekomen wordt.

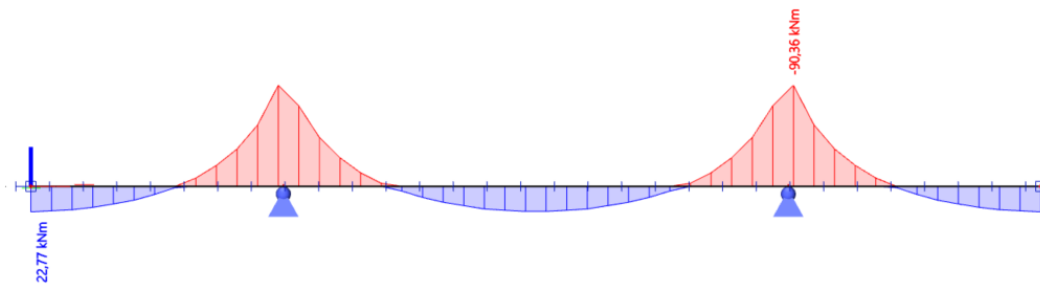
$$d_{opt} = 97 * \sqrt{\frac{M_{sd}}{f_{ck}}}$$

Bepalen dikte plaat				
Bepalen dikte plaat 5x5 en 5 kN/m²				
Grenstoestand	UGT-B			
Betonkwaliteit	f_{ck}	30 N/mm ²		
Langeduureffect bij buiging	α_{cc}	0,85 (-)		
Materiaalfactor beton	γ_m	1,5 (-)		
Rekenwaarde betonkwaliteit	f_{cd}	17 N/mm ²		
Staalkwaliteit	S	500 N/mm ²		
Materiaalfactor staal	γ_s	1,15 (-)		
Rekenwaarde staalkwaliteit	f_{yd}	435 N/mm ²		
Overspanning	L	5 m		
Variabele gebruiksbelasting	q	5 kN/m ²		
Schatting onderwapening		10 mm		
Schatting bovenwapening		16 mm		
Nominale betondekking	C_{nom}	25 mm		
Slankheid	L/d	24 (-)		
Geschatte optimale nuttige hoogte	d	208 mm		
Veldmoment				
Geschatte hoogte	h	240	120	110
Buigmoment	M_{sd}	24,86	19,43	19,01
Optimale nuttige hoogte	d_{opt}	88	78	77
Totale hoogte	h_{tot}	120	110	110
Piekmoment				
Geschatte hoogte	h	240	210	200
Buigmoment	M_{sd}	98,57	92	90,36
Optimale nuttige hoogte	d_{opt}	176	170	168
Totale hoogte	h_{tot}	210	200	200
Totale hoogte op basis van veldmoment	h_{tot}	110 mm		
Totale hoogte op basis van piekmoment	h_{tot}	200 mm		
Totale hoogte op basis van brand	h_{tot}	180 mm		
Totale hoogte op basis van lijf	h_{tot}	162 mm		
Gekozen totale hoogte	h_{tot}	200 mm		

Grafiek



Integratiestroom



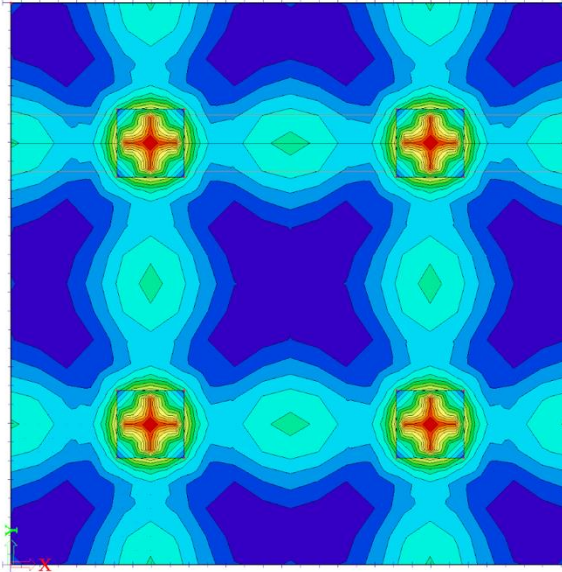
Ponscontrole

Ponscontrole: plaat 5x5 en 5kN/m ²			
Controle pons		Controle pons	
Grenstoestand	UGT-B	Grenstoestand	UGT-B
Betonkwaliteit	f_{ck} 30 N/mm ²	Betonkwaliteit	f_{ck} 30 N/mm ²
Langeduureffect bij buiging	α_{cc} 0,85 (-)	Langeduureffect bij buiging	α_{cc} 0,85 (-)
Materiaalfactor beton	γ_m 1,5 (-)	Materiaalfactor beton	γ_m 1,5 (-)
Rekenwaarde betonkwaliteit	f_{cd} 17 N/mm ²	Rekenwaarde betonkwaliteit	f_{cd} 17 N/mm ²
Staaikwaliteit	S 500 N/mm ²	Staaikwaliteit	S 500 N/mm ²
Materiaalfactor staal	γ_s 1,15 (-)	Materiaalfactor staal	γ_s 1,15 (-)
Rekenwaarde staaikwaliteit	f_{yd} 435 N/mm ²	Rekenwaarde staaikwaliteit	f_{yd} 435 N/mm ²
Overspanning	L 5 m	Overspanning	L 5 m
Variabele gebruiksbelasting	q 5 kN/m ²	Variabele gebruiksbelasting	q 5 kN/m ²
Nominale betondekking	C_{nom} 25 mm	Nominale betondekking	C_{nom} 25 mm
Voorspanning	σ_{cp} 0 N/mm ²	Voorspanning	σ_{cp} 0 N/mm ²
Afmetingen kolom	a 250 mm b 250 mm	Afmetingen kolomkop	a 1200 mm b 1200 mm
Hoogte van de plaat	h 200 mm	Hoogte van de plaat	h 200 mm
Hoogte kolomkop	h_{kop} 100 mm	Hoogte kolomkop	h_{kop} mm
Totale hoogte	h_{tot} 300 mm	Totale hoogte	h_{tot} 200 mm
Bovenwapening	A_{sx} ϕ_1 16 à 100 mm A_{sy} ϕ_2 16 à 100 mm	Bovenwapening	A_{sx} ϕ_1 16 à 100 mm A_{sy} ϕ_2 16 à 100 mm
Onderwapening	A_{sx} ϕ_1 10 à 150 mm A_{sy} ϕ_2 10 à 150 mm	Onderwapening	A_{sx} ϕ_1 10 à 150 mm A_{sy} ϕ_2 10 à 150 mm
Reactiekracht kolom	V_{Ed} 459 kN	Reactiekracht kolom	V_{Ed} 459 kN
Schets		Schets	
Berekening		Berekening	
Nuttige hoogte x-richting (mm)	16 n ₁ 10 d ₁ 267	Nuttige hoogte x-richting (mm)	16 n ₁ 10 d ₁ 167
Nuttige hoogte y-richting (mm)	16 n ₂ 10 d ₂ 251	Nuttige hoogte y-richting (mm)	16 n ₂ 10 d ₂ 151
Gemiddelde nuttige hoogte	d 259 mm	Gemiddelde nuttige hoogte	d 159 mm
Gemiddeld wapening %	ρ_x 0,00753 (-) ρ_y 0,00801 (-) ρ 0,00777 (-) v 0,528 (-)	Gemiddeld wapening %	ρ_x 0,01204 (-) ρ_y 0,01332 (-) ρ 0,01266 (-) v 0,528 (-)
Maximale ponsweerstand	$V_{rd,max}$ 4,488 N/mm ²	Maximale ponsweerstand	$V_{rd,max}$ 4,488 N/mm ²
Krit omtrek dagvlak	u_0 1000 mm	Krit omtrek dagvlak	u_0 4800 mm
1ste krit omtrek	u_{midden} 4254,69 mm β_{midden} 1,15 (-)	1ste krit omtrek	u_{midden} 6798,05 mm β_{midden} 1,15 (-)
Controle	$V_{Ed,midden}$ 2,038 N/mm ²	Controle	$V_{Ed,midden}$ 0,692 N/mm ²
Max ponsweerstand		Max ponsweerstand	
Rekenwaarde aangrijpende schuifspanning	$V_{Ed,midden}$ 0,479 N/mm ² k 1,88 (-) $V_{dc,min}$ 0,494 N/mm ²	Rekenwaarde aangrijpende schuifspanning	$V_{Ed,midden}$ 0,488 N/mm ² k 2,00 (-) $V_{dc,min}$ 0,542 N/mm ²
Weerstandbiedende schuifspanning bijdrage beton	V_{dc} 0,644 N/mm ²	Weerstandbiedende schuifspanning bijdrage beton	V_{dc} 0,807 N/mm ²
Kolomkop nodig?	nee	Kolomkop nodig?	nee
Grenswaarde	600 x 600 x 50	Grenswaarde	600 x 600 x 50
Gekozen waarde	1200 x 1200 x 100	Gekozen waarde	1200 x 1200 x 100

Spanningscontrole

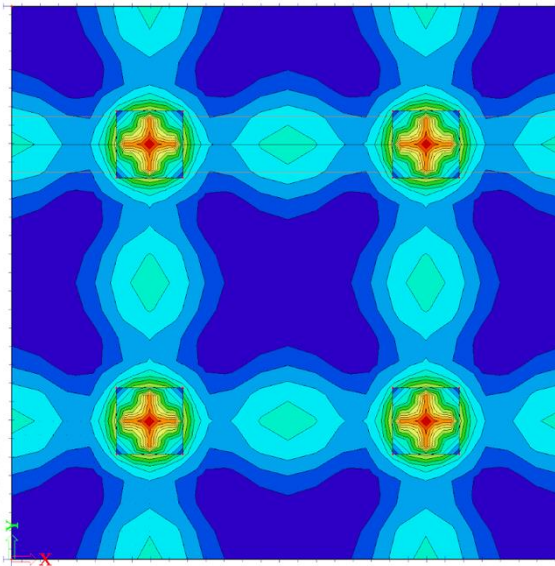
GGT-Q (4,0 MPa < 13,5 MPa → OK)

2D spanning/ rek
Waarde: σ_x
Lineaire berekening
Combinatie: RCT-quasi (automatisch)
Extreem: Globaal
Selectie: Alle
Locatie: In knooppunten gem. bij
macro. Systeem: LCS net element



GGT-K (5,5 MPa < 18 MPa → OK)

2D spanning/ rek
Waarde: σ_x
Lineaire berekening
Combinatie: RCT-ku (automatisch)
Extreem: Globaal
Selectie: Alle
Locatie: In knooppunten gem. bij
macro. Systeem: LCS net element



Wapening

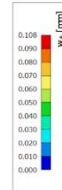
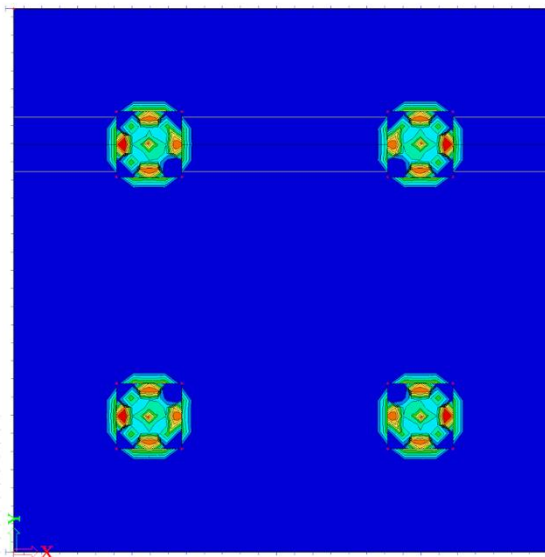
Minimum wapening				Maximum wapening			
Brosse breuk (mm ² /m)	258	>	222	Maximum wapening (mm ²)	8000		
Scheurbeheersing (mm ²)	232						

Overzicht wapening plaat 5x5 en 5 kN/m ²											
	φ	à	A _s	mm ² /m	mm ²	mm ³	m ³	kg/m ³	kg		kg
Onderwapening	8	150	335	335	3350	33500000	0,0335	7850	263,0	x2	526,0
Bovenwapening	10	150	524	524	5236	52359878	0,0524	7850	411,0	x2	822,1
Bijlegwapening	16	100	2011	2011	4021,24	8042477	0,00804	7850	63,1	x8	505,1
										Totaal	1853,1

Bijlegzone kolommen	
Lengte (m)	Breedte (m)
2	2

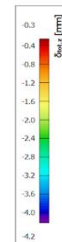
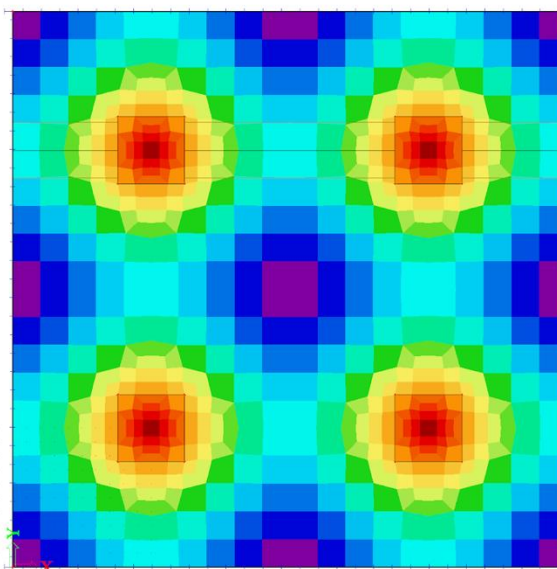
Scheurwijdte W_{max}

Scheurwijdte (BGT)
 Waarde: w_s
 Lineaire berekening
 Combinatie: BGT-quasi (automatisch)
 Extreem: Globaal
 Selectie: Alle
 Locatie: In knooppunten gem. bij macro. Systeem: LCS net element



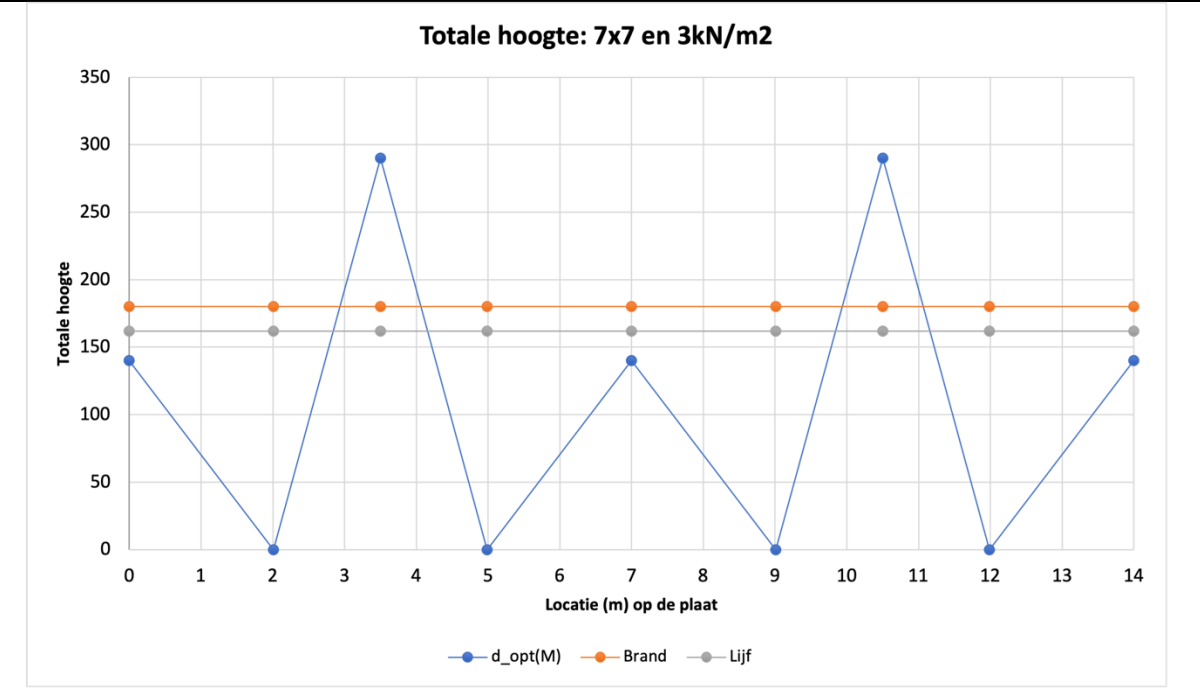
Doorbuiging $\delta_{tot,z}$ GGT-Q (L/300)

Normaalkromme vervormingen
 Waarde: $\delta_{tot,z}$
 Lineaire berekening
 Combinatie: BGT-quasi (automatisch)
 Extreem: Globaal
 Selectie: Alle
 Locatie: In centrum. Systeem: LCS net element
 Componenten van interne krachten parallel aan de rib worden berekend op effectieve breedte van de rib als nul in aanmerking genomen.
 Systeem: LCS net element
 NAV selectie: Alle

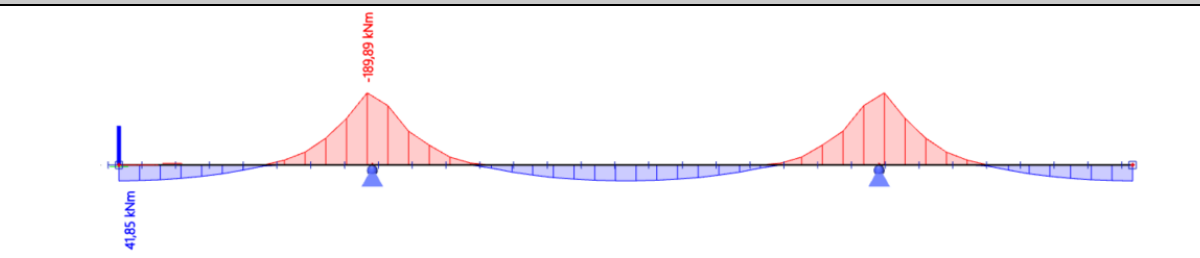


Bepalen dikte plaat				
Bepalen dikte plaat 7x7 en 3 kN/m²				
Grenstoestand	UGT-B			
Betonkwaliteit	f_{ck}	30 N/mm ²		
Langeduureffect bij buiging	α_{cc}	0,85 (-)		
Materiaalfactor beton	γ_m	1,5 (-)		
Rekenwaarde betonkwaliteit	f_{cd}	17 N/mm ²		
Staalkwaliteit	S	500 N/mm ²		
Materiaalfactor staal	γ_s	1,15 (-)		
Rekenwaarde staalkwaliteit	f_{yd}	435 N/mm ²		
Overspanning	L	7 m		
Variabele gebruiksbelasting	q	3 kN/m ²		
Schatting onderwapening		10 mm		
Schatting bovenwapening		16 mm		
Nominale betondekking	C_{nom}	25 mm		
Slankheid	L/d	24 (-)		
Geschatte optimale nuttige hoogte	d	292 mm		
Veldmoment				
Geschatte hoogte	h	330	160	140
Buigmoment	M_{sd}	48,44	34,43	32,79
Optimale nuttige hoogte	d_{opt}	123	104	101
Totale hoogte	h_{tot}	160	140	140
Piekmoment				
Geschatte hoogte	h	330	300	290
Buigmoment	M_{sd}	219,17	208,2	204,5
Optimale nuttige hoogte	d_{opt}	262	256	253
Totale hoogte	h_{tot}	300	290	290
Totale hoogte op basis van veldmoment	h_{tot}	140 mm		
Totale hoogte op basis van piekmoment	h_{tot}	290 mm		
Totale hoogte op basis van brand	h_{tot}	180 mm		
Totale hoogte op basis van lijf	h_{tot}	162 mm		
Gekozen totale hoogte	h_{tot}	250 mm		

Grafiek



Integratiestroom



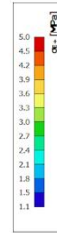
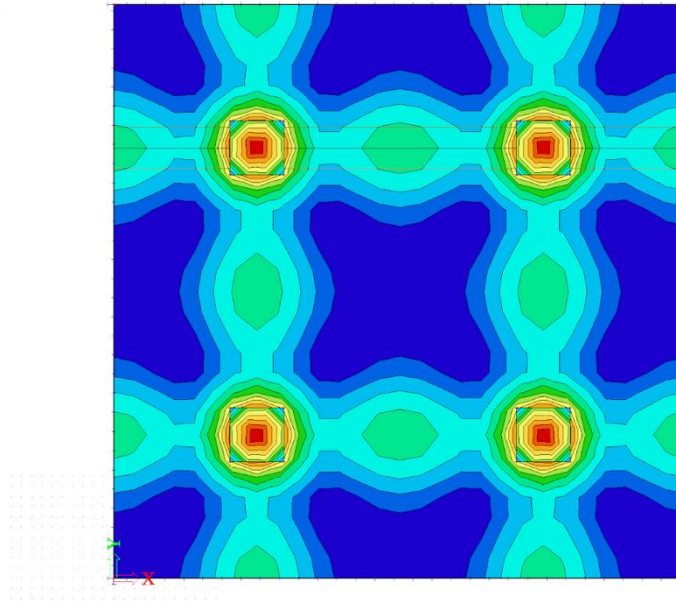
Ponscontrole

Ponscontrole: plaat 7x7 en 3kN/m ²									
Controle pons		Controle pons							
Grenstoestand	UGT-B	Grenstoestand	UGT-B						
Betonkwaliteit	f_{ck}	30 N/mm ²	Betonkwaliteit	f_{ck}	30 N/mm ²				
Langeduureffect bij buiging	α_{cc}	0,85 (-)	Langeduureffect bij buiging	α_{cc}	0,85 (-)				
Materiaalfactor beton	γ_m	1,5 (-)	Materiaalfactor beton	γ_m	1,5 (-)				
Rekenwaarde betonkwaliteit	f_{cd}	17 N/mm ²	Rekenwaarde betonkwaliteit	f_{cd}	17 N/mm ²				
Staaikwaliteit	S	500 N/mm ²	Staaikwaliteit	S	500 N/mm ²				
Materiaalfactor staal	γ_s	1,15 (-)	Materiaalfactor staal	γ_s	1,15 (-)				
Rekenwaarde staaikwaliteit	f_{yd}	435 N/mm ²	Rekenwaarde staaikwaliteit	f_{yd}	435 N/mm ²				
Overspanning	L	7 m	Overspanning	L	7 m				
Variabele gebruiksbelasting	q	3 kN/m ²	Variabele gebruiksbelasting	q	3 kN/m ²				
Nominale betondekking	C_{nom}	25 mm	Nominale betondekking	C_{nom}	25 mm				
Voorspanning	σ_{cp}	0 N/mm ²	Voorspanning	σ_{cp}	0 N/mm ²				
Afmetingen kolom	a	300 mm	Afmetingen kolomkop	a	1300 mm				
	b	300 mm		b	1300 mm				
Hoogte van de plaat	h	250 mm	Hoogte van de plaat	h	250 mm				
Hoogte kolomkop	h_{kop}	130 mm	Hoogte kolomkop	h_{kop}	mm				
Totale hoogte	h_{tot}	380 mm	Totale hoogte	h_{tot}	250 mm				
Bovenwapening	ϕ_1	16	à	100 mm	Bovenwapening	ϕ_1	16	à	100 mm
A_{sx}	ϕ_2	16	à	100 mm	A_{sy}	ϕ_2	16	à	100 mm
A_{sy}					Onderwapening				
Onderwapening	ϕ_1	10	à	150 mm	A_{sx}	ϕ_1	10	à	150 mm
A_{sx}	ϕ_2	10	à	150 mm	A_{sy}	ϕ_2	10	à	150 mm
A_{sy}					Reactiekracht kolom	V_{Ed}	829 kN		
Reactiekracht kolom	V_{Ed}	829 kN			Reactiekracht kolom	V_{Ed}	829 kN		
Schets				Schets					
Berekening				Berekening					
Nuttige hoogte x-richting (mm)	16 n ₁	10 d ₁	347	Nuttige hoogte x-richting (mm)	16 n ₁	10 d ₁	217		
Nuttige hoogte y-richting (mm)	16 n ₂	10 d ₂	331	Nuttige hoogte y-richting (mm)	16 n ₂	10 d ₂	201		
Gemiddelde nuttige hoogte	d	339 mm		Gemiddelde nuttige hoogte	d	209 mm			
Gemiddeld wapening %	ρ_x	0,00579 (-)		Gemiddeld wapening %	ρ_x	0,00927 (-)			
	ρ_y	0,00607 (-)			ρ_y	0,01 (-)			
	ρ	0,00593 (-)			ρ	0,00963 (-)			
	v	0,528 (-)			v	0,528 (-)			
Maximale ponsweerstand	$V_{d,max}$	4,488 N/mm ²		Maximale ponsweerstand	$V_{d,max}$	4,488 N/mm ²			
Krit omtrek dagvlak	l_0	1200 mm		Krit omtrek dagvlak	l_0	5200 mm			
1ste krit omtrek	l_{midden}	5460,00 mm		1ste krit omtrek	l_{midden}	7826,37 mm			
	β_{midden}	1,15 (-)			β_{midden}	1,15 (-)			
Controle	$V_{Ed,midden,0}$	2,344 N/mm ²		Controle	$V_{Ed,midden,0}$	0,877 N/mm ²			
Max ponsweerstand				Max ponsweerstand					
Rekenwaarde aangrijpende	$V_{Ed,midden}$	0,515 N/mm ²		Rekenwaarde aangrijpende	$V_{Ed,midden}$	0,583 N/mm ²			
	k	1,77 (-)			k	1,98 (-)			
Weerstandbiedende	$V_{dc,min}$	0,451 N/mm ²		Weerstandbiedende	$V_{dc,min}$	0,533 N/mm ²			
	V_{dc}	0,554 N/mm ²			V_{dc}	0,728 N/mm ²			
Kolomkop nodig?	nee			Kolomkop nodig?	nee				
Grenswaarde	1000 x 1000 x 110			Grenswaarde	1000 x 1000 x 110				
Gekozen waarde	1300 x 1300 x 130			Gekozen waarde	1300 x 1300 x 130				

Spanningscontrole

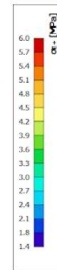
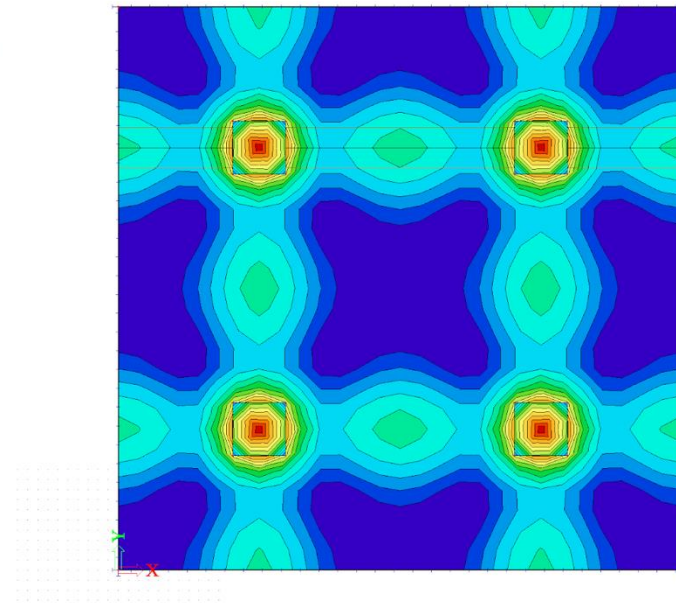
GGT-Q (5,0 MPa < 13,5 MPa → OK)

2D spanning/ rek
 Waarden: σ_x
 Lineaire berekening
 Combinatie: BGT-quaal (automatisch)
 Extrem: Globaal
 Selectie: Alle
 Locatie: In knooppunten gem. bij
 macro. Systeem: LCS net element



GGT-K (6,0 MPa < 18 MPa → OK)

2D spanning/ rek
 Waarden: σ_x
 Lineaire berekening
 Combinatie: BGT-kaar (automatisch)
 Extrem: Globaal
 Selectie: Alle
 Locatie: In knooppunten gem. bij
 macro. Systeem: LCS net element



Wapening

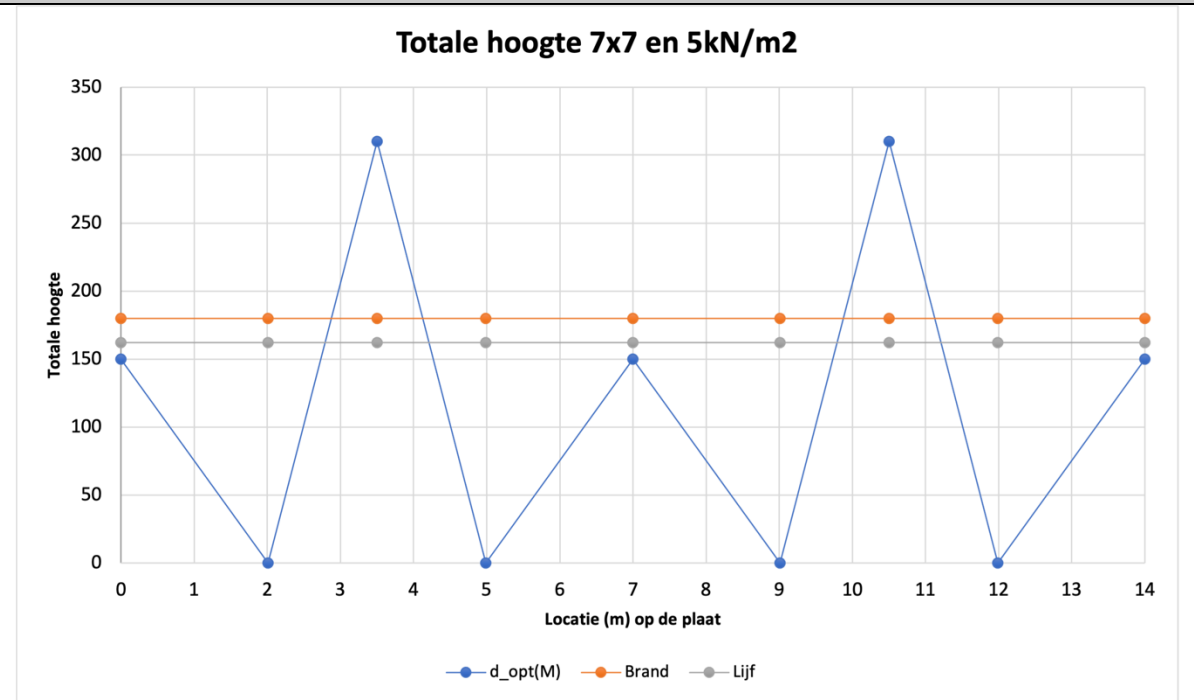
Minimum wapening			Maximum wapening		
Brosse breuk (mm ² /m)	331	> 286	Maximum wapening (mm ²)	10000	
Scheurbeheersing (mm ²)	290				

Overzicht wapening plaat 7x7 en 3 kN/m ²											
	ϕ	\dot{a}	A_s	mm ² /m	mm ²	mm ³	m ³	kg/m ³	kg		kg
Onderwapening	10	150	524	524	7330	102625360	0,10263	7850	805,6	x2	1611,2
Bovenwapening	10	150	524	524	7330	102625360	0,10263	7850	805,6	x2	1611,2
Bijlegwapening	16	100	2011	2011	5027	17592919	0,01759	7850	138,1	x8	1104,8
Totaal											4327,3

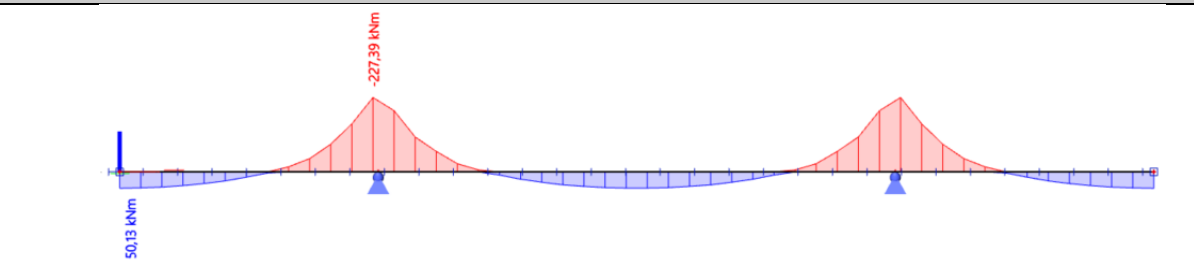
Bijlegzone kolommen	
Lengte (m)	Breedte (m)
3,5	2,5

Bepalen dikte plaat				
Bepalen dikte plaat 7x7 en 5 kN/m²				
Grenstoestand	UGT-B			
Betonkwaliteit	f_{ck}	30 N/mm ²		
Langeduureffect bij buiging	α_{cc}	0,85 (-)		
Materiaalfactor beton	γ_m	1,5 (-)		
Rekenwaarde betonkwaliteit	f_{cd}	17 N/mm ²		
Staalkwaliteit	S	500 N/mm ²		
Materiaalfactor staal	γ_s	1,15 (-)		
Rekenwaarde staalkwaliteit	f_{yd}	435 N/mm ²		
Overspanning	L	7 m		
Variabele gebruiksbelasting	q	5 kN/m ²		
Schatting onderwapening		10 mm		
Schatting bovenwapening		16 mm		
Nominale betondekking	C_{nom}	25 mm		
Slankheid	L/d	24 (-)		
Geschatte optimale nuttige hoogte	d	292 mm		
Veldmoment				
Geschatte hoogte	h	330	170	150
Buigmoment	M_{sd}	55,94	42,75	41,1
Optimale nuttige hoogte	d_{opt}	132	116	114
Totale hoogte	h_{tot}	170	150	150
Piekmoment				
Geschatte hoogte	h	330	320	310
Buigmoment	M_{sd}	253,6	249,9	246,2
Optimale nuttige hoogte	d_{opt}	282	280	278
Totale hoogte	h_{tot}	320	310	310
Totale hoogte op basis van veldmoment	h_{tot}	150 mm		
Totale hoogte op basis van piekmoment	h_{tot}	310 mm		
Totale hoogte op basis van brand	h_{tot}	180 mm		
Totale hoogte op basis van lijf	h_{tot}	162 mm		
Gekozen totale hoogte	h_{tot}	260 mm		

Grafiek



Integratiestroom



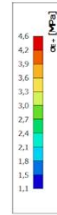
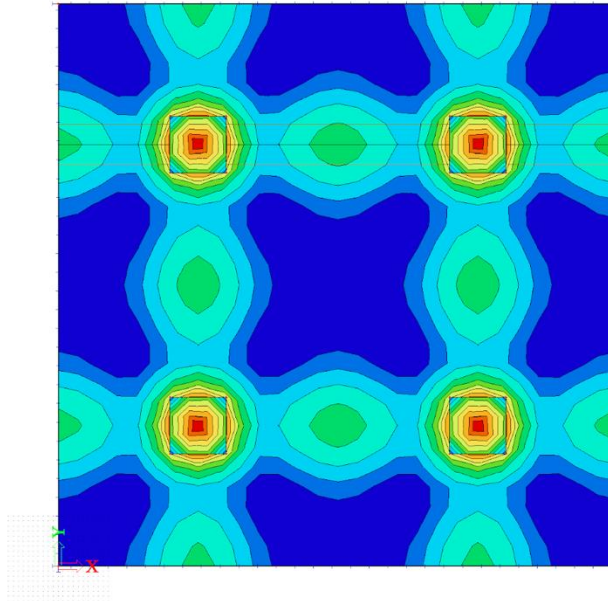
Ponscontrole

Ponscontrole: plaat 7x7 en 5kN/m ²			
Controle pons		Controle pons	
Grenstoestand	UGT-B	Grenstoestand	UGT-B
Betonkwaliteit	f_{ck} 30 N/mm ²	Betonkwaliteit	f_{ck} 30 N/mm ²
Langeduureffect bij buiging	α_{cc} 0,85 (-)	Langeduureffect bij buiging	α_{cc} 0,85 (-)
Materiaalfactor beton	γ_m 1,5 (-)	Materiaalfactor beton	γ_m 1,5 (-)
Rekenwaarde betonkwaliteit	f_{cd} 17 N/mm ²	Rekenwaarde betonkwaliteit	f_{cd} 17 N/mm ²
Staaikwaliteit	S 500 N/mm ²	Staaikwaliteit	S 500 N/mm ²
Materiaalfactor staal	γ_s 1,15 (-)	Materiaalfactor staal	γ_s 1,15 (-)
Rekenwaarde staaikwaliteit	f_{yd} 435 N/mm ²	Rekenwaarde staaikwaliteit	f_{yd} 435 N/mm ²
Overspanning	L 7 m	Overspanning	L 7 m
Variabele gebruiksbelasting	q 5 kN/m ²	Variabele gebruiksbelasting	q 5 kN/m ²
Nominale betondekking	C_{nom} 25 mm	Nominale betondekking	C_{nom} 25 mm
Voorspanning	σ_{cp} 0 N/mm ²	Voorspanning	σ_{cp} 0 N/mm ²
Afmetingen kolom	a 300 mm b 300 mm	Afmetingen kolomkop	a 1400 mm b 1400 mm
Hoogte van de plaat	h 260 mm	Hoogte van de plaat	h 260 mm
Hoogte kolomkop	h_{kop} 150 mm	Hoogte kolomkop	h_{kop} mm
Totale hoogte	h_{tot} 410 mm	Totale hoogte	h_{tot} 260 mm
Bovenwapening		Bovenwapening	
A_{sx}	ϕ_1 16 à 100 mm	A_{sx}	ϕ_1 16 à 100 mm
A_{sy}	ϕ_2 16 à 100 mm	A_{sy}	ϕ_2 16 à 100 mm
Onderwapening		Onderwapening	
A_{sx}	ϕ_1 10 à 150 mm	A_{sx}	ϕ_1 10 à 150 mm
A_{sy}	ϕ_2 10 à 150 mm	A_{sy}	ϕ_2 10 à 150 mm
Reactiekracht kolom	V_{Ed} 989 kN	Reactiekracht kolom	V_{Ed} 989 kN
Schets		Schets	
Berekening		Berekening	
Nuttige hoogte x-richting (mm)	16 n_1 10 d_1 377	Nuttige hoogte x-richting (mm)	16 n_1 10 d_1 227
Nuttige hoogte y-richting (mm)	16 n_2 10 d_2 361	Nuttige hoogte y-richting (mm)	16 n_2 10 d_2 211
Gemiddelde nuttige hoogte	d 369 mm	Gemiddelde nuttige hoogte	d 219 mm
Gemiddeld wapening %	ρ_x 0,00533 (-)	Gemiddeld wapening %	ρ_x 0,00886 (-)
	ρ_y 0,00557 (-)		ρ_y 0,00953 (-)
	ρ 0,00545 (-)		ρ 0,00919 (-)
	v 0,528 (-)		v 0,528 (-)
Maximale ponsweerstand	$V_{rd,max}$ 4,488 N/mm ²	Maximale ponsweerstand	$V_{rd,max}$ 4,488 N/mm ²
Krit omtrek dagvlak	u_0 1200 mm	Krit omtrek dagvlak	u_0 5600 mm
1ste krit omtrek	u_{midden} 5836,99 mm	1ste krit omtrek	u_{midden} 8352,04 mm
Controle	β_{midden} 1,15 (-)	Controle	β_{midden} 1,15 (-)
Max ponsweerstand	$V_{Ed,midden}$ 2,569 N/mm ²	Max ponsweerstand	$V_{Ed,midden}$ 0,927 N/mm ²
Rekenwaarde aangrijpende	$V_{Ed,midden}$ 0,528 N/mm ²	Rekenwaarde aangrijpende	$V_{Ed,midden}$ 0,622 N/mm ²
	k 1,74 (-)		k 1,96 (-)
Weerstandbiedende	$V_{rdc,min}$ 0,439 N/mm ²	Weerstandbiedende	$V_{rdc,min}$ 0,524 N/mm ²
Kolomkop nodig?	nee	Kolomkop nodig?	nee
Grenswaarde	1200 x 1200 x 150	Grenswaarde	1200 x 1200 x 150
Gekozen waarde	1400 x 1400 x 150	Gekozen waarde	1400 x 1400 x 150

Spanningscontrole

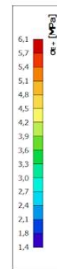
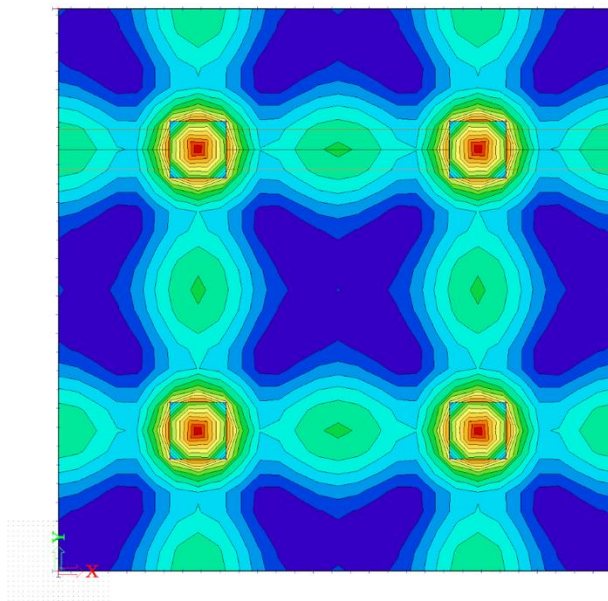
GGT-Q (4,6 MPa < 13,5 MPa → OK)

2D spanning/ rek
 Waardes: σ_x
 Lineaire berekening
 Combinatie: BGT quasi (automatisch)
 Extremum: Globaal
 Selectie: Alle
 Locatie: In knooppunten gem. bij macro. Systeem: LCS net element



GGT-K (6,1 MPa < 18 MPa → OK)

2D spanning/ rek
 Waardes: σ_x
 Lineaire berekening
 Combinatie: BGT kar (automatisch)
 Extremum: Globaal
 Selectie: Alle
 Locatie: In knooppunten gem. bij macro. Systeem: LCS net element



Wapening

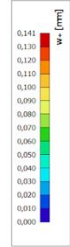
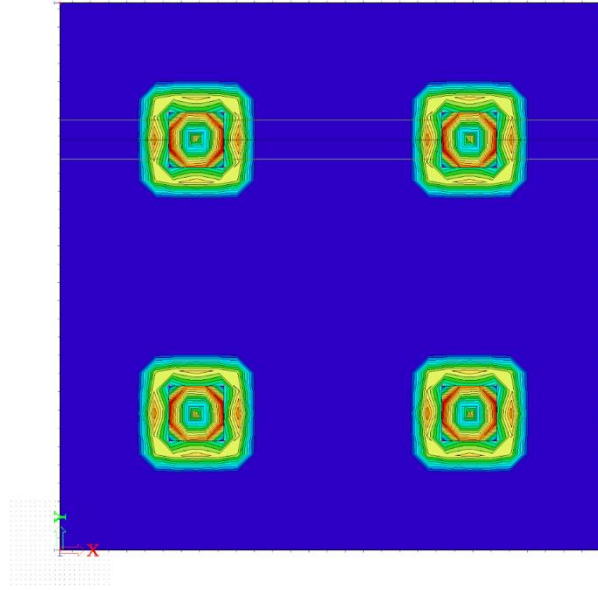
Minimum wapening			Maximum wapening		
Brosse breuk (mm ² /m)	347	> 299	Maximum wapening (mm ²)	10400	
Scheurbeheersing (mm ²)	301				

Overzicht wapening plaat 7x7 en 5 kN/m ²										
	φ	à	A _s	mm ² /m	mm ²	mm ³	m ³	kg/m ³	kg	kg
Onderwapening	10	150	524	524	7330	102625360	0,10263	7850	805,6 x2	1611,2
Bovenwapening	10	150	524	524	7330	102625360	0,10263	7850	805,6 x2	1611,2
Bijlegwapening	20	100	3142	3142	7854	27488936	0,02749	7850	215,8 x8	1726,3
Totaal										4948,7

Bijlegzone kolommen	
Lengte (m)	Breedte (m)
3,5	2,5

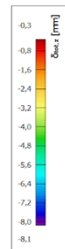
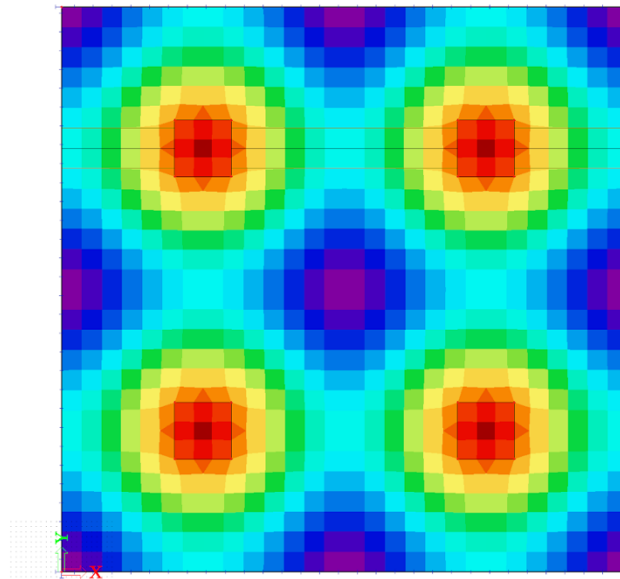
Scheurwijdte W_{max}

Scheurwijdte (BGT)
Waardes: w_s
Lineaire berekening
Combinatie: BGT-quasi (automatisch)
Extreem: Globaal
Selectie: Alle
Locatie: In knooppunten gem. bij
macro. Systeem: LCS net element



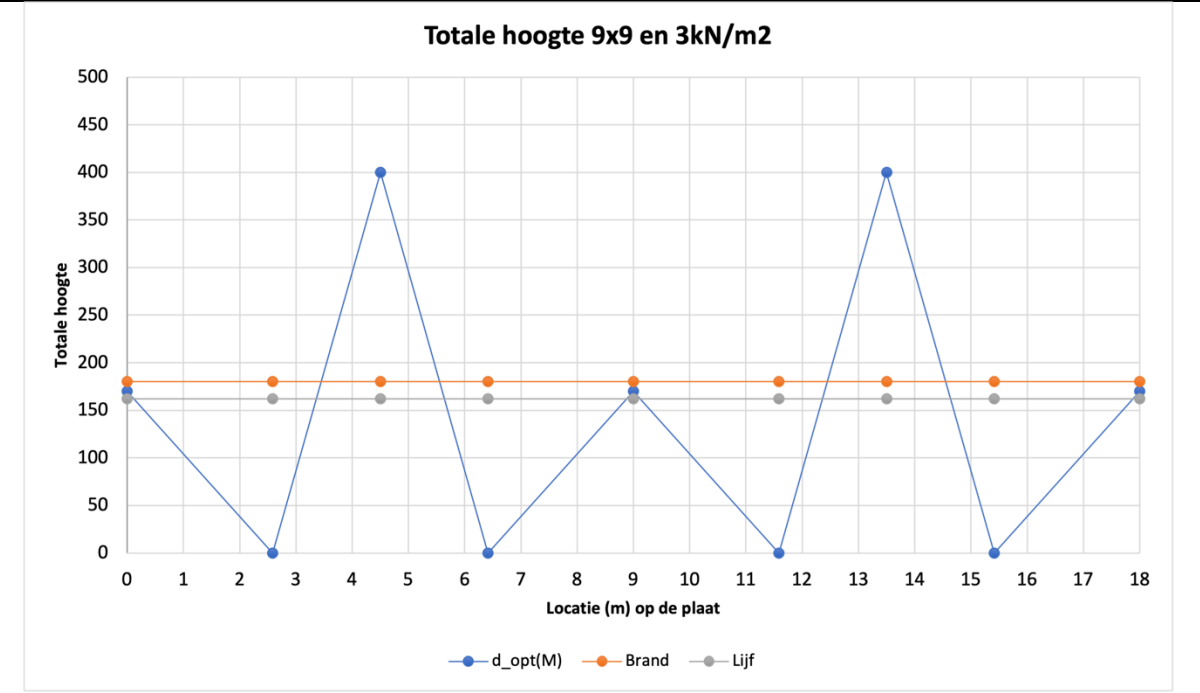
Doorbuiging $\delta_{tot,z}$ GGT-Q (L/300)

Normaafhankelijke vervormingen
Waardes: $\delta_{tot,z}$
Lineaire berekening
Combinatie: BGT-quasi
(automatisch) Extreem: Globaal
Selectie: Alle
Locatie: In centrum. Systeem: LCS net
element
Componenten van interne krachten
parallel aan de rib worden binnen de
effectieve breedte van de rib als nul in
aanmerking genomen.
Systeem: LCS net element
NAV selectie: Alle

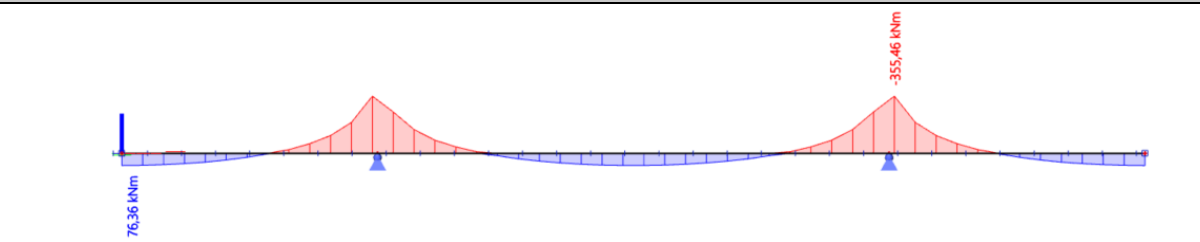


Bepalen dikte plaat				
Bepalen dikte plaat 9x9 en 3 kN/m²				
Grenstoestand	UGT-B			
Betonkwaliteit	f_{ck}	30	N/mm ²	
Langeduureffect bij buiging	α_{cc}	0,85	(-)	
Materiaalfactor beton	γ_m	1,5	(-)	
Rekenwaarde betonkwaliteit	f_{cd}	17	N/mm ²	
Staalkwaliteit	S	500	N/mm ²	
Materiaalfactor staal	γ_s	1,15	(-)	
Rekenwaarde staalkwaliteit	f_{yd}	435	N/mm ²	
Overspanning	L	9	m	
Variabele gebruiksbelasting	q	3	kN/m ²	
Schatting onderwapening		10	mm	
Schatting bovenwapening		16	mm	
Nominale betondekking	C_{nom}	25	mm	
Slankheid	L/d	24	(-)	
Geschatte optimale nuttige hoogte	d	375	mm	
Veldmoment				
Geschatte hoogte	h	410	200	180
Buigmoment	M_{sd}	91,5	62,7	60
Optimale nuttige hoogte	d_{opt}	169	140	137
Totale hoogte	h_{tot}	200	180	170
Piekmoment				
Geschatte hoogte	h	410	400	400
Buigmoment	M_{sd}	425,5	419,14	419,14
Optimale nuttige hoogte	d_{opt}	365	363	363
Totale hoogte	h_{tot}	400	400	400
Totale hoogte op basis van veldmoment	h_{tot}	170	mm	
Totale hoogte op basis van piekmoment	h_{tot}	400	mm	
Totale hoogte op basis van brand	h_{tot}	180	mm	
Totale hoogte op basis van lijf	h_{tot}	162	mm	
Gekozen totale hoogte	h_{tot}	300	mm	

Grafiek



Integratiestrook



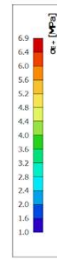
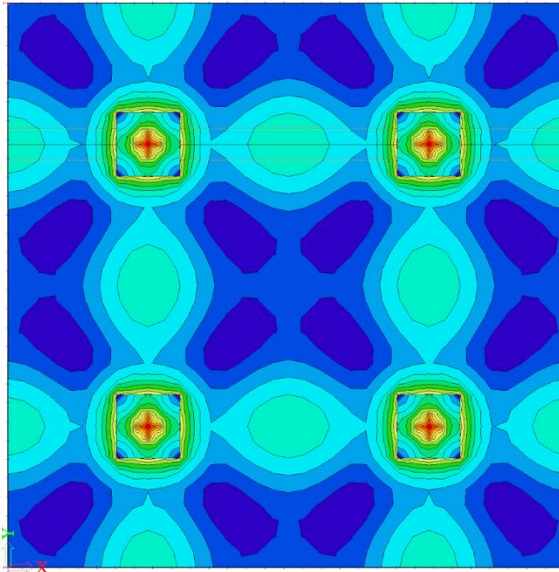
Ponscontrole

Ponscontrole: plaat 9x9 en 3kN/m ²							
Controle pons		Controle pons					
Grenstoestand	UGT-B	Grenstoestand	UGT-B				
Betonkwaliteit	f_{ck}	30 N/mm ²	Betonkwaliteit	f_{ck}	30 N/mm ²		
Langeduureffect bij buiging	α_{cc}	0,85 (-)	Langeduureffect bij buiging	α_{cc}	0,85 (-)		
Materiaalfactor beton	γ_m	1,5 (-)	Materiaalfactor beton	γ_m	1,5 (-)		
Rekenwaarde betonkwaliteit	f_{cd}	17 N/mm ²	Rekenwaarde betonkwaliteit	f_{cd}	17 N/mm ²		
Staalkwaliteit	S	500 N/mm ²	Staalkwaliteit	S	500 N/mm ²		
Materiaalfactor staal	γ_s	1,15 (-)	Materiaalfactor staal	γ_s	1,15 (-)		
Rekenwaarde staalkwaliteit	f_{yd}	435 N/mm ²	Rekenwaarde staalkwaliteit	f_{yd}	435 N/mm ²		
Overspanning	L	9 m	Overspanning	L	9 m		
Variabele gebruiksbelasting	q	3 kN/m ²	Variabele gebruiksbelasting	q	3 kN/m ²		
Nominale betondekking	C_{nom}	25 mm	Nominale betondekking	C_{nom}	25 mm		
Voorspanning	σ_{cp}	0 N/mm ²	Voorspanning	σ_{cp}	0 N/mm ²		
Afmetingen kolom	a	350 mm	Afmetingen kolomkop	a	2000 mm		
	b	350 mm		b	2000 mm		
Hoogte van de plaat	h	300 mm	Hoogte van de plaat	h	300 mm		
Hoogte kolomkop	h_{kop}	200 mm	Hoogte kolomkop	h_{kop}	mm		
Totale hoogte	h_{tot}	500 mm	Totale hoogte	h_{tot}	300 mm		
Bovenwapening			Bovenwapening				
A_{sx}	ϕ_1	20	à	100 mm			
A_{sy}	ϕ_2	20	à	100 mm			
Onderwapening			Onderwapening				
A_{sx}	ϕ_1	10	à	150 mm			
A_{sy}	ϕ_2	10	à	150 mm			
Reactiekracht kolom	V_{Ed}	1524 kN	1497	Reactiekracht kolom	V_{Ed}	1524 kN	1497
Schets							
Berekening							
Nuttige hoogte x-richting (mm)	20 n_1	10 d_1	465	Nuttige hoogte x-richting (mm)	20 n_1	10 d_1	265
Nuttige hoogte y-richting (mm)	20 n_2	10 d_2	445	Nuttige hoogte y-richting (mm)	20 n_2	10 d_2	245
Gemiddelde nuttige hoogte	d	455 mm		Gemiddelde nuttige hoogte	d	255 mm	
Gemiddeld wapening %	ρ_x	0,00676 (-)		Gemiddeld wapening %	ρ_x	0,011855 (-)	
	ρ_y	0,00706 (-)			ρ_y	0,012823 (-)	
	ρ	0,00691 (-)			ρ	0,012329 (-)	
	v	0,528 (-)			v	0,528 (-)	
Maximale ponsweerstand	$V_{d,max}$	4,488 N/mm ²		Maximale ponsweerstand	$V_{d,max}$	4,488 N/mm ²	
Krit omtrek dagvlak	μ_0	1400 mm		Krit omtrek dagvlak	μ_0	8000 mm	
1ste krit omtrek	μ_{midden}	7117,70 mm		1ste krit omtrek	μ_{midden}	11204,42 mm	
	β_{midden}	1,15 (-)			β_{midden}	1,15 (-)	
Controle	$V_{Ed,midden,0}$	2,751 N/mm ²		Controle	$V_{Ed,midden,0}$	0,859 N/mm ²	
Max ponsweerstand				Max ponsweerstand			
Rekenwaarde aangrijpende	$V_{d,midden}$	0,541 N/mm ²		Rekenwaarde aangrijpende	$V_{d,midden}$	0,613 N/mm ²	
	k	1,66 (-)			k	1,89 (-)	
Weerstandbiedende	$V_{dc,min}$	0,411 N/mm ²		Weerstandbiedende	$V_{dc,min}$	0,496 N/mm ²	
	V_{dc}	0,548 N/mm ²			V_{dc}	0,754 N/mm ²	
Kolomkop nodig?		nee		Kolomkop nodig?		nee	
Grenswaarde	1500 x 1500 x 190			Grenswaarde	1500 x 1500 x 190		
Gekozen waarde	2000 x 2000 x 200			Gekozen waarde	2000 x 2000 x 200		

Spanningscontrole

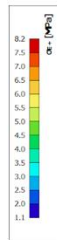
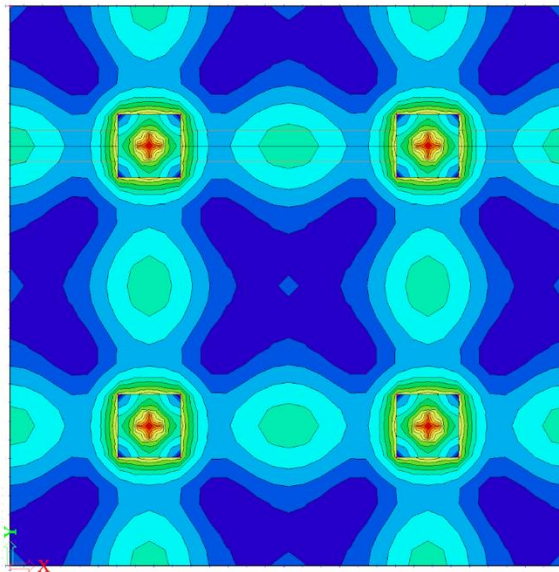
GGT-Q (6,9 MPa < 13,5 MPa → OK)

2D spanning/ rek
 Waardes: σ_x
 Lineaire berekening
 Combinatie: RCT-quasi (automatisch)
 Extreem: Globaal
 Selectie: Alle
 Locatie: In knooppunten gem. bij macro. Systeem: LCS net element



GGT-K (8,2 MPa < 18 MPa → OK)

2D spanning/ rek
 Waardes: σ_x
 Lineaire berekening
 Combinatie: RCT-quasi (automatisch)
 Extreem: Globaal
 Selectie: Alle
 Locatie: In knooppunten gem. bij macro. Systeem: LCS net element



Wapening

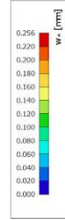
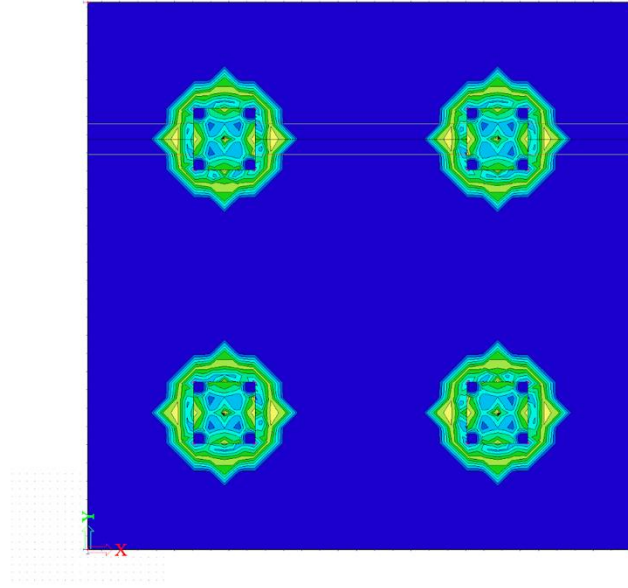
Minimum wapening				Maximum wapening			
Brosse breuk (mm ² /m)	407	>	351	Maximum wapening (mm ²)	12000		
Scheurbeheersing (mm ²)	348						

Overzicht wapening plaat 9x9 en 3 kN/m ²											
	φ	à	A _s	mm ² /m	mm ²	mm ³	m ³	kg/m ³	kg		kg
Onderwapening	10	150	524	524	9425	169646003	0,16965	7850	1331,7	x2	2663,4
Bovenwapening	10	150	524	524	9425	169646003	0,16965	7850	1331,7	x2	2663,4
Bijlegwapening	20	100	3142	3142	10996	60475659	0,06048	7850	474,7	x8	3797,9
										Totaal	9124,8

Bijlegzone kolommen	
Lengte (m)	Breedte (m)
5,5	3,5

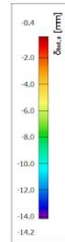
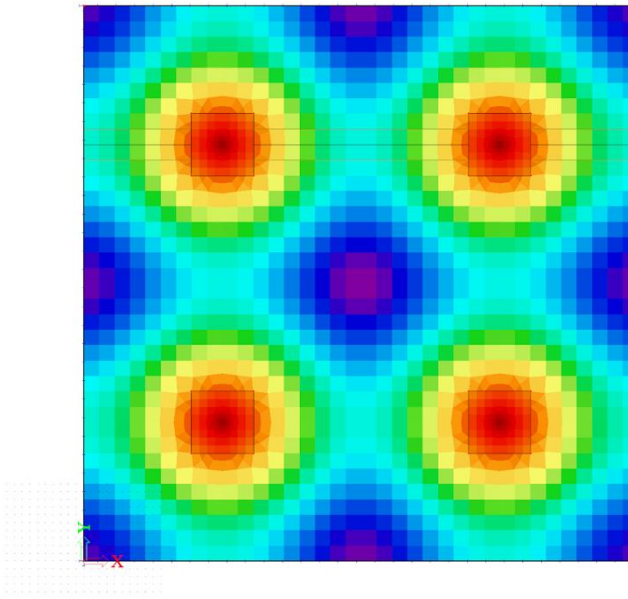
Scheurwijdte W_{max}

Scheurwijdte (BGT)
 Waarde: w_s
 Lineaire berekening
 Combinatie: BGT-quasi (automatisch)
 Extreem: Globaal
 Selectie: Alle
 Localie: In knooppunten gem. bij
 macro. Systeem: LCS net element



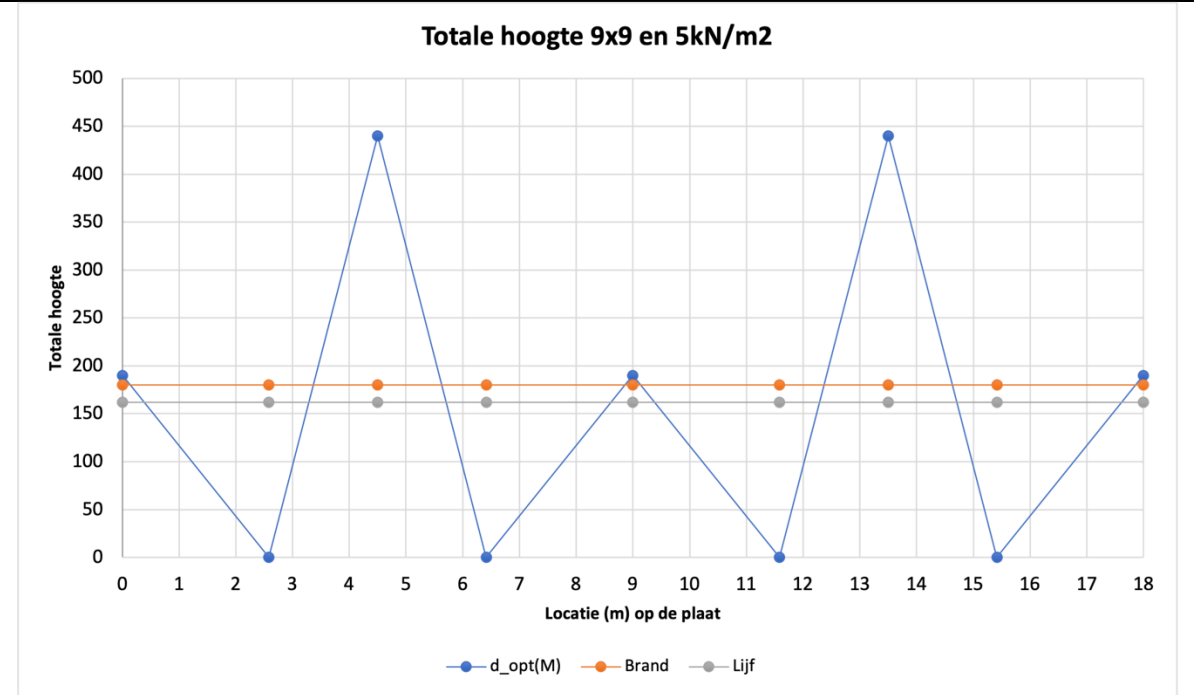
Doorbuiging $\delta_{tot,z}$ GGT-Q (L/300)

Normaalkwadratische vervormingen
 Waarde: $\delta_{tot,z}$
 Lineaire berekening
 Combinatie: BGT-quasi
 (automatisch) Extreem: Globaal
 Selectie: Alle
 Localie: In centrum. Systeem: LCS net
 element
 Componenten van interne krachten
 parallel aan de rib worden binnen de
 effectieve breedte van de rib als nul in
 aanmerking genomen.
 Systeem: LCS net element
 NAV selectie: Alle

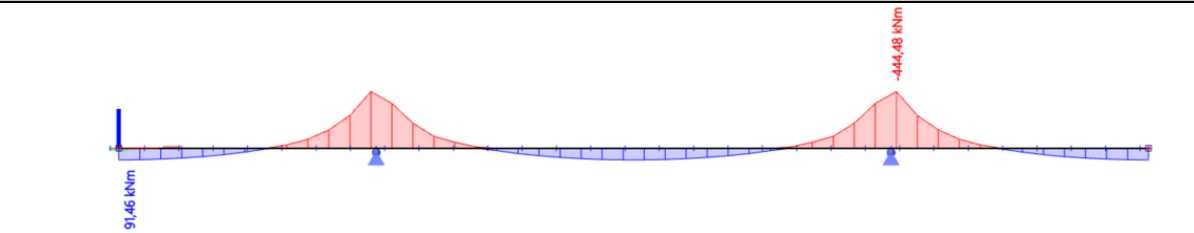


Bepalen dikte plaat				
Bepalen dikte plaat 9x9 en 5 kN/m²				
Grenstoestand	UGT-B			
Betonkwaliteit	f_{ck}	30 N/mm ²		
Langeduureffect bij buiging	α_{cc}	0,85 (-)		
Materiaalfactor beton	γ_m	1,5 (-)		
Rekenwaarde betonkwaliteit	f_{cd}	17 N/mm ²		
Staalkwaliteit	S	500 N/mm ²		
Materiaalfactor staal	γ_s	1,15 (-)		
Rekenwaarde staalkwaliteit	f_{yd}	435 N/mm ²		
Overspanning	L	9 m		
Variabele gebruiksbelasting	q	5 kN/m ²		
Schatting onderwapening		10 mm		
Schatting bovenwapening		16 mm		
Nominale betondekking	C_{nom}	25 mm		
Slankheid	L/d	24 (-)		
Geschatte optimale nuttige hoogte	d	375 mm		
Veldmoment				
Geschatte hoogte	h	410	220	190
Buigmoment	M_{sd}	103,8	77,8	73,7
Optimale nuttige hoogte	d_{opt}	180	156	152
Totale hoogte	h_{tot}	220	190	190
Piekmoment				
Geschatte hoogte	h	410	430	440
Buigmoment	M_{sd}	503,2	516,3	522,8
Optimale nuttige hoogte	d_{opt}	397	402	405
Totale hoogte	h_{tot}	430	440	440
Totale hoogte op basis van veldmoment	h_{tot}	190 mm		
Totale hoogte op basis van piekmoment	h_{tot}	440 mm		
Totale hoogte op basis van brand	h_{tot}	180 mm		
Totale hoogte op basis van lijf	h_{tot}	162 mm		
Gekozen totale hoogte	h_{tot}	320 mm		

Grafiek



Integratiestrook



Ponscontrole

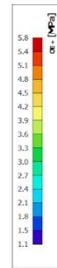
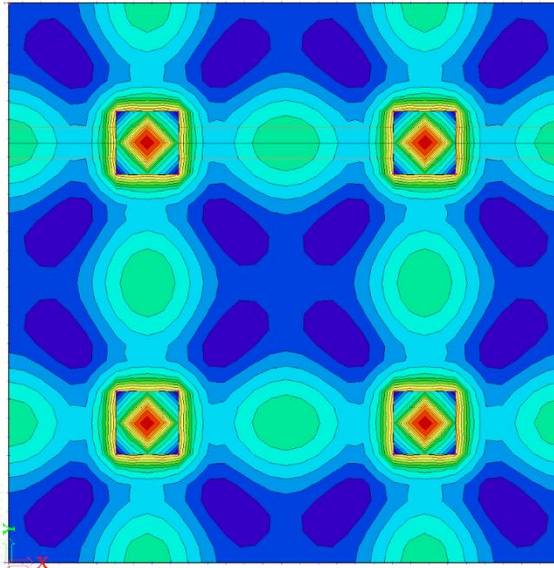
Ponscontrole: plaat 9x9 en 5kN/m ²			
Grenstoestand		UGT-B	
Betonkwaliteit	f_{ck}	30	N/mm ²
Langeduureffect bij buiging	α_{cc}	0,85	(-)
Materiaalfactor beton	γ_m	1,5	(-)
Rekenwaarde betonkwaliteit	f_{cd}	17	N/mm ²
Staalkwaliteit	S	500	N/mm ²
Materiaalfactor staal	γ_s	1,15	(-)
Rekenwaarde staalkwaliteit	f_{yd}	435	N/mm ²
Overspanning	L	9	m
Variabele gebruiksbelasting	q	5	kN/m ²
Nominale betondekking	C_{nom}	25	mm
Voorspanning	σ_{cp}	0	N/mm ²
Afmetingen kolom		a	350 mm
		b	350 mm
Hoogte van de plaat		h	320 mm
Hoogte kolomkop		h_{kop}	250 mm
Totale hoogte		h_{tot}	570 mm
Bovenwapening		A_{sx}	ϕ_1 20 à 100 mm
		A_{sy}	ϕ_2 20 à 100 mm
Onderwapening		A_{sx}	ϕ_1 10 à 150 mm
		A_{sy}	ϕ_2 10 à 150 mm
Reactiekracht kolom		V_{Ed}	1794 kN
Schets			
Berekening			
Nuttige hoogte x-richting (mm)	20 n_1	10 d_1	535
Nuttige hoogte y-richting (mm)	20 n_2	10 d_2	515
Gemiddelde nuttige hoogte	d	525	mm
Gemiddeld wapening %	ρ_x	0,00587	(-)
	ρ_y	0,0061	(-)
	ρ	0,00599	(-)
	v	0,528	(-)
Maximale ponsweerstand	$V_{d,max}$	4,488	N/mm ²
Krit omtrek dagvlak	u_0	1400	mm
1ste krit omtrek	u_{midden}	7997,34	mm
	β_{midden}	1,15	(-)
Controle	$V_{Ed,midden,t}$	2,806	N/mm ²
Max ponsweerstand	$V_{Ed,midden}$	0,491	N/mm ²
Rekenwaarde aangrijpende	k	1,62	(-)
	$V_{dc,min}$	0,394	N/mm ²
Weerstandbiedende	V_{dc}	0,508	N/mm ²
Kolomkop nodig?	nee		
Grenswaarde	1700 x 1700 x 240		
Gekozen waarde	2000 x 2000 x 250		

Ponscontrole: plaat 9x9 en 5kN/m ²			
Grenstoestand		UGT-B	
Betonkwaliteit	f_{ck}	30	N/mm ²
Langeduureffect bij buiging	α_{cc}	0,85	(-)
Materiaalfactor beton	γ_m	1,5	(-)
Rekenwaarde betonkwaliteit	f_{cd}	17	N/mm ²
Staalkwaliteit	S	500	N/mm ²
Materiaalfactor staal	γ_s	1,15	(-)
Rekenwaarde staalkwaliteit	f_{yd}	435	N/mm ²
Overspanning	L	9	m
Variabele gebruiksbelasting	q	5	kN/m ²
Nominale betondekking	C_{nom}	25	mm
Voorspanning	σ_{cp}	0	N/mm ²
Afmetingen kolomkop		a	2000 mm
		b	2000 mm
Hoogte van de plaat		h	320 mm
Hoogte kolomkop		h_{kop}	mm
Totale hoogte		h_{tot}	320 mm
Bovenwapening		A_{sx}	ϕ_1 20 à 100 mm
		A_{sy}	ϕ_2 20 à 100 mm
Onderwapening		A_{sx}	ϕ_1 10 à 150 mm
		A_{sy}	ϕ_2 10 à 150 mm
Reactiekracht kolom		V_{Ed}	1794 kN
Schets			
Berekening			
Nuttige hoogte x-richting (mm)	20 n_1	10 d_1	285
Nuttige hoogte y-richting (mm)	20 n_2	10 d_2	265
Gemiddelde nuttige hoogte	d	275	mm
Gemiddeld wapening %	ρ_x	0,0110231	(-)
	ρ_y	0,0118551	(-)
	ρ	0,0114315	(-)
	v	0,528	(-)
Maximale ponsweerstand	$V_{d,max}$	4,488	N/mm ²
Krit omtrek dagvlak	u_0	8000	mm
1ste krit omtrek	u_{midden}	11455,75	mm
	β_{midden}	1,15	(-)
Controle	$V_{Ed,midden,t}$	0,938	N/mm ²
Max ponsweerstand	$V_{Ed,midden}$	0,655	N/mm ²
Rekenwaarde aangrijpende	k	1,85	(-)
	$V_{dc,min}$	0,483	N/mm ²
Weerstandbiedende	V_{dc}	0,722	N/mm ²
Kolomkop nodig?	nee		
Grenswaarde	1700 x 1700 x 240		
Gekozen waarde	2000 x 2000 x 250		

Spanningscontrole

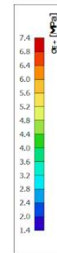
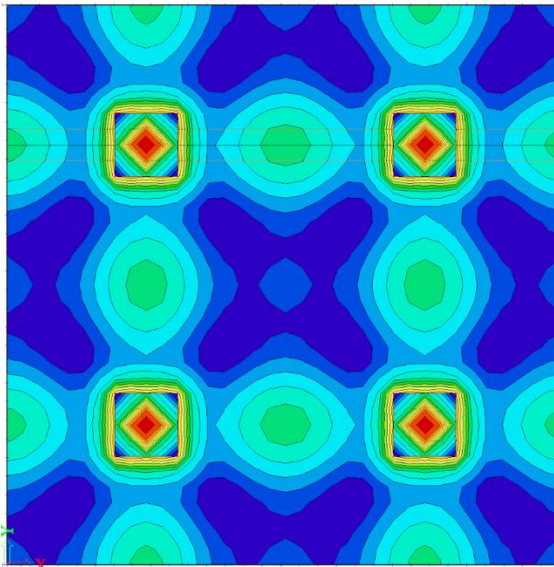
GGT-Q (5,8 MPa < 13,5 MPa → OK)

2D spanning/ rek
 Waardes: σ_x
 Lineaire berekening
 Combinatie: BGT-equal (automatisch)
 Extreem: Globaal
 Selectie: Alle
 Locatie: In knooppunten gem. bij
 macro. Systeem: LCS niet element



GGT-K (7,4 MPa < 18 MPa → OK)

2D spanning/ rek
 Waardes: σ_x
 Lineaire berekening
 Combinatie: BGT-kei (automatisch)
 Extreem: Globaal
 Selectie: Alle
 Locatie: In knooppunten gem. bij
 macro. Systeem: LCS niet element



Wapening

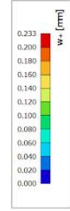
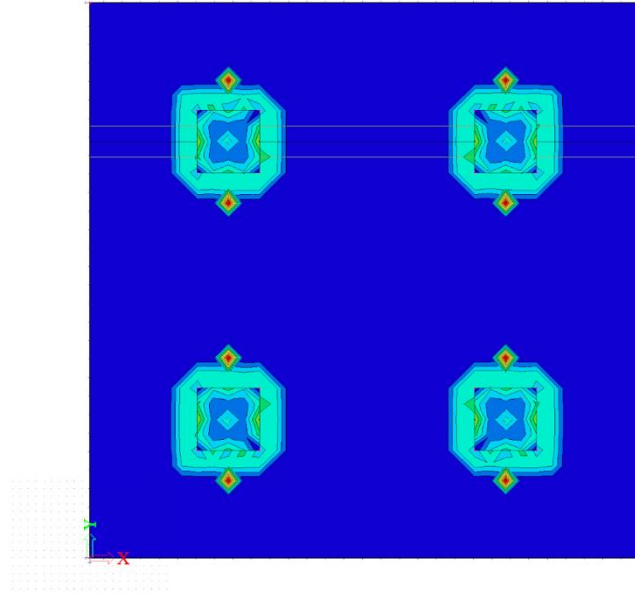
Minimum wapening			Maximum wapening		
Brosse breuk (mm ² /m)	435	>	376	Maximum wapening (mm ²)	12800
Scheurbeheersing (mm ²)	371				

Overzicht wapening plaat 9x9 en 5 kN/m ²											
	ϕ	s	A_s	mm ² /m	mm ²	mm ³	m ³	kg/m ³	kg		kg
Onderwapening	12	150	754	754	13572	244290245	0,24429	7850	1917,7	x2	3835,4
Bovenwapening	12	150	754	754	13572	244290245	0,24429	7850	1917,7	x2	3835,4
Bijlegwapening	20	100	3142	3142	10996	49480084	0,04948	7850	388,4	x8	3107,3
										Totaal	10778,1

Bijlegzone kolommen	
Lengte (m)	Breedte (m)
4,5	3,5

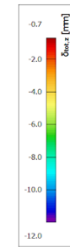
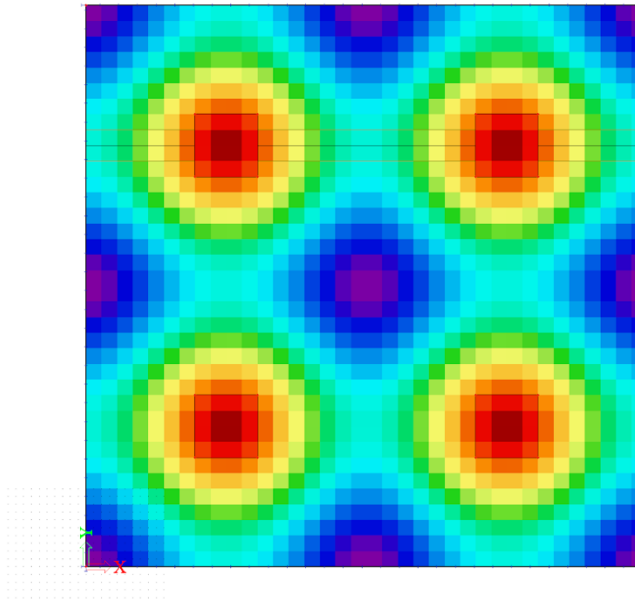
Scheurwijdte W_{max}

Scheurwijdte (BCT)
Waardes: w_s
Lineaire berekening
Combinatie: BCT-quasi (automatisch)
Extreem: Globaal
Selectie: Alle
Localis: In knooppunten gem. bij
macro. Systeem: LCS net element



Doorbuiging $\delta_{tot,z}$ GGT-Q (L/300)

Normaalkruisvormingen
Waardes: $\delta_{tot,z}$
Lineaire berekening
Combinatie: BCT-quasi (automatisch)
Extreem: Globaal
Selectie: Alle
Localis: In centrum. Systeem: LCS net element
Componenten van interne krachten parallel aan de rib worden binnen de effectieve breedte van de rib als nul in aanmerking genomen.
Systeem: LCS net element
NAV-selectie: Alle



Bijlage G: Hoeveelheden en kostprijzen van de actuele situatie

Economische vergelijking tussen een vlakke plaatvloer zonder naspanning en een vlakke plaatvloer met naspanning																			
Nummer	Type Vloer	Overspanning m	Belastingen Per. (kN/m²) Var. (kN/m²)	Dikte mm	Opp. m²	Vbeton m³	Post Tension kg	kg/m²	Wapening kg	kg/m³	EH Prijs Beton €/m³	Kostprijs Beton €	EH prijs wapening €/kg	Kostprijs wapening €	EH prijs PT €/m³	Kostprijs PT €	Totaal €	Totaal €/m²	
																			Per. (kN/m²)
1	RC Flat Slab	5	3	3	190	100	19,576	/	1684	86	127	2486,152	1,5	2525	/	/	5011	50	
2	RC Flat Slab	5	3	5	200	100	20,576	/	1853	90	127	2613,152	1,5	2780	/	/	5393	54	
3	RC Flat Slab	7	3	3	250	196	49,8788	/	4327	87	127	6334,6076	1,5	6491	/	/	12826	65	
4	RC Flat Slab	7	3	5	260	196	52,136	/	4949	95	127	6621,272	1,5	7423	/	/	14044	72	
5	RC Flat Slab	9	3	3	300	324	100,4	/	9125	91	127	12750,8	1,5	13687	/	/	26438	82	
6	RC Flat Slab	9	3	5	320	324	107,68	/	10778	100	127	13675,36	1,5	16167	/	/	29842	92	
7	PT Flat Slab	5	3	3	200	100	20	235	1100	55	135	2700	1,5	1650	80	1600	5950	60	
8	PT Flat Slab	5	3	5	200	100	20	235	1100	55	135	2700	1,5	1650	80	1600	5950	60	
9	PT Flat Slab	7	3	3	200	196	40,145	857	2648	67	135	5419,575	1,5	3972	80	3211,6	12603	64	
10	PT Flat Slab	7	3	5	200	196	40,55	857	2657	67	135	5474,25	1,5	3985,5	80	3244	12704	65	
11	PT Flat Slab	9	3	3	220	324	74,88	1441	4856	67	135	10108,8	1,5	7284	80	5990,4	23383	72	
12	PT Flat Slab	9	3	5	230	324	79,08	1441	4995	67	135	10675,8	1,5	7642,5	80	6326,4	24645	76	

Bijlage H: Planning voor bepaling van huurtermijn bekisting en doorstempeling, plaat RC C30/37

