Bachelor eindwerk

De verandering van wapeningsvarianten ten gevolge van toenemende overspanning

Katarzyna Malyszka

1e Begeleider TU Delft: René Braam

Begeleider Sweco: Nick Monteny

2e Begeleider TU Delft: Pierre Hoogenboom

TU Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen

22 oktober 2018

VOORWOORD

Het rapport dat voor u ligt is het resultaat van een onderzoek naar de verandering van wapeningsvarianten ten gevolge van toenemende overspanning. Het onderzoek beperkt zich tot twee wapeningsvarianten: traditioneel gewapend en voorgespannen. Dit rapport is tegelijkertijd de afsluiting van de bachelor fase van de studie Civiele Techniek aan de Technische Universiteit in Delft.

Graag wil ik een bijzonder woord van dank richten aan heer René Braam en Nick Monteny voor hun waardevolle begeleiding tijdens het schrijven van dit rapport. Daarnaast wil ik heer Nico Broek bedanken voor de mogelijkheid om het bachelor eindwerk bij Sweco Nederland te volgen. Ten slotte bedank ik uiteraard heer Pierre Hoogenboom voor zijn rol als tweede afstudeerbegeleider.

Ik wens u veel leesplezier.

Katarzyna Malyszka

SAMENVATTING

Tot op de dag van vandaag worden nog steeds niet-optimale keuzes gemaakt op het gebied van wapeningsvarianten. Het is belangrijk om een juiste keuze te maken, omdat de kosten van latere wijzigingen in het project hoog kunnen oplopen. Ook hebben de ontwerpers later in het project steeds minder invloed.

Om uit te zoeken welke wapeningsvariant, traditioneel gewapend of voorgespannen, het meest gunstig is bij een bepaalde overspanning, wordt een fictief viaduct met steeds grotere overspanning ontworpen. Hiervoor wordt eerst een kort literatuuronderzoek gedaan naar de eigenschappen van de wapeningsvarianten. Met behulp van de Eurocode wordt vervolgens bepaald hoe de verkeersbelasting weergegeven kan worden.

De viaductplaat wordt als een stelsel in 2 richtingen kruisende liggers geschematiseerd. Op deze manier kan het bekende studiemateriaal toegepast kan worden. Om gewichtsbesparing door te voeren, worden behalve massieve liggers ook kokerliggers gebruikt.

Aan de hand van dat schema is met behulp van SCIA bepaald wat de maatgevende krachten en momenten per liggersoort en overspanning zijn. De bijbehorende ligger is vervolgens getoetst op sterkte, scheurwijdte en doorbuiging. Uit de berekeningen is gebleken dat de scheurwijdte maatgevend is.

De resultaten hebben uitgewezen dat voor de massieve liggers met een massieve doorsnede de overspanning maximaal 15,9 meter mag zijn en dat de afstand tussen de wapeningsstaven een beperkende factor is. Voor de liggers met een holle doorsnede is dat 17,9 meter en is de scheurwijdte een beperkende factor.

De gevonden resultaten zijn daarna vergeleken met de ontwerpgrafieken van voorgespannen liggers. De voorgespannen massieve liggers worden gebruikt voor een overspanning tussen 8 en 21 meter afhankelijk van de profielhoogte. Voor de voorgespannen kokerliggers is dat de overspanning tussen 15 en 32 meter afhankelijk van de profielhoogte en gelijkmatig verdeelde belasting.

Uit de vergelijkingen is gebleken dat de voorgespannen liggers voor beide doorsnedes een grotere overspanning kunnen halen, maar ook dat voor bepaalde overspanningen beide wapeningsvarianten mogelijk zijn.

Om erachter te komen welke uitvoer van de viaductplaat goedkoper is, zijn voor de massieve liggers de totale kosten tegen overspanning uitgezet. De conclusie is dat het tot een overspanning van 8,5 meter goedkoper is om de viaductplaat in traditioneel gewapend beton uit te voeren. Voor een grotere overspanning is het goedkoper om voorgespannen liggers te gebruiken.

INHOUDSOPGAVE

Voorwoord 1

Samenvatting 2

1 Inleiding 6

1.1 Probleemstelling 6

1.2 Doelstelling 6

1.3 Onderzoeksvraag en deelvragen 7

2 Eigenschappen van de wapeningsvarianten 8

2.1 Traditioneel gewapend beton 8

2.2 Voorgespannen beton 8

3 Belastingen 10

3.1 Dwarsprofielontwerp 10

3.2 Indelingen van een rijweg in theoretische rijstroken 10

3.3 Verkeersbelasting 11

3.3.1 Belastingsmodellen 11

3.3.2 Uitwerking met correctiefactoren 12

4 Balkrooster 14

4.1 Schematisering 14

4.1.1 Afmetingen 14

4.1.2 Van gelijkmatig verdeelde belasting naar lijnlasten 14

4.2 Model 15

4.2.1 Maatgevende belastingscombinaties 15

4.2.2 Maximale doorsnedekrachten 16

5 Uiterste Grenstoestand 17

5.1 Rekenwaarden beton en staal 17

5.2 Minimale dekking 17

5.3 Eerste schattingen 17

5.4 Buiging 18

5.4.1 Controle op dimensionering balk 18

5.4.2 Minimumoppervlakte van betonstaal 18

5.4.3 Berekening benodigde hoeveelheid buigwapening 18

5.4.4 Controle of de hoeveelheid wapening wel kwijt kan in de doorsnede 19

5.5 Dwarskracht 19

5.5.1 Controle dwarskracht zonder wapening 19

5.5.2 Berekening dwarskrachtwapening 20

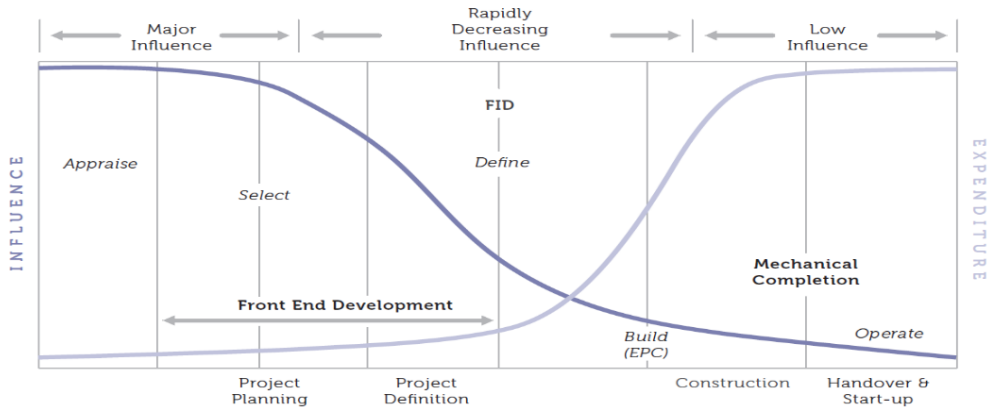
5.5.3 Controle dwarskracht met wapening 20
6 Bruikbaarheidsgrenstoestand 21
6.1 Scheurbeheersing 21
6.2 Doorbuigingscontrole 21
7 Uitwerking 22
7.1 Massieve doorsnede 22
7.1.1 Overspanning 10,8 meter 22
7.1.2 Overspanning 15,6 meter 23
7.1.3 Overspanning 20,4 meter 23
7.1.4 Overspanning 18,0 meter 24
7.2 Holle doorsnede 25
7.2.1 Overspanning 10,8 meter 25
7.2.2 Overspanning 15,6 meter 26
7.2.3 Overspanning 20,4 meter 26
7.2.4 Overspanning 18 meter 26
8 Resultaten 28
8.1 Traditioneel gewapende liggers 28
8.1.1 Massieve doorsnede 28
8.1.2 Holle doorsnede 29
8.2 Voorgespannen prefab liggers 30
8.2.1 Massieve doorsnede 30
8.2.2 Holle doorsnede 31
8.3 Vergelijking 31
8.3.1 Keuze op basis van kosten 32
9 Conclusie 34
Beperkingen 35
Aanbevelingen 35
Bibliografie 36
Figuren- en tabellenlijst 37
Bijlage 1 39
Bijlage 2 41
Bijlage 3 46
Bijlage 4 47
Bijlage 5 48
Bijlage 6 103
Bijlage 6 147

1 INLEIDING

In de civieltechnische wereld is beton een onmisbaar materiaal. Aan het begin van elk project wordt al besloten of de bouwwerk in beton, staal, hout of een ander materiaal uitgevoerd wordt. Indien er gekozen wordt voor beton, moeten verschillende wapeningsvarianten overwogen worden. Het is belangrijk om een juiste keuze te maken, omdat de kosten van latere wijzigingen in het project hoog kunnen oplopen. Ook hebben de ontwerpers later in het project steeds minder invloed. Zie ter illustratie figuur 1.1.

Om het optimaal ontwerp van viaductplaten mogelijk te maken, is in dit verslag middels modellen in SCIA, berekeningen in Python en grafieken in Excel onderzocht bij welke overspanning de keuze voor een voorgespannen betonnen brug optimaler is dan de keuze voor traditionele wapening.

Een overzicht van bronnen die bij alle figuren en tabellen horen, zijn in de figuren- en tabellenlijst te vinden. Veel figuren zijn in de bijlagen gezet om het verslag overzichtelijk te houden.



Figuur 1.1 - Relatie tussen invloed en kosten gedurende de levensduur van een project

1.1 PROBLEEMSTELLING

Tot op de dag van vandaag worden nog steeds niet-optimale keuzes gemaakt op het gebied van wapeningsvarianten bij betonnen bruggen. De ontwerper maakt hierbij een afweging tussen traditioneel gewapend of voorgespannen wapeningsvariant. Pas in een latere stadium van het project wordt duidelijk of hij de optimale keuze heeft gemaakt. Ook als het niet zo is, is het op dat moment niet meer rendabel om weer terug te gaan naar het ontwerpstadium om alle berekeningen opnieuw te maken. Als resultaat hiervan worden de bouwmaterialen niet optimaal gebruikt.

1.2 DOELSTELLING

Het doel is dat de lezers na het lezen van dit document zelf in staat zijn om aan het beginstadium van een project een optimale keuze te maken tussen de twee wapeningsvarianten bij een gegeven overspanning. Belangrijk om te onthouden is het feit dat de resultaten alleen geldig zijn voor in het rapport genoemde of vergelijkbare condities.

Het eindproduct is een reeks van overspanningen waarbij aangegeven wordt welke van de twee wapeningsvarianten toegepast kan worden. Er zullen ook overspanningen zijn waarbij alle twee opties mogelijk zijn. In dat tussenliggende gebied moet de ontwerper zelf een keuze maken basis van beschikbare tijd, budget en ruimte.

1.3 ONDERZOEKSVRAAG EN DEELVRAGEN

Om het gestelde doel te bereiken, moet een antwoord op de volgende onderzoeksvraag gevonden worden.

- *Bij welke overspanning is de keuze voor een voorgespannen betonnen brug optimaler dan de keuze voor traditionele wapening?*

Het rapport is onderverdeeld in verschillende hoofdstukken. In deze hoofdstukken worden de onderstaande deelvragen uitgewerkt.

- *Wat zijn de karakteristieken van traditioneel gewapend en voorgespannen wapeningsvarianten en hoe verschillen ze van elkaar?*

- *Welke belastingen zijn van belang bij de toetsing van een viaductligger en hoe kan de waarde hiervan bepaald worden?*

- *Hoe kan de betonnen plaatbrug gemodelleerd worden en wat zijn de grootste doorsnedekrachten?*

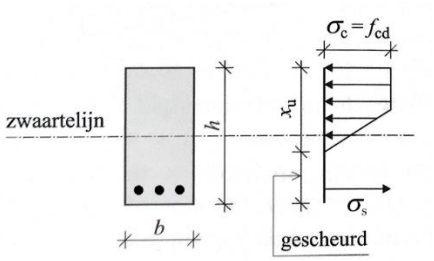
- *Hoe kunnen beide wapeningsvarianten met elkaar worden vergeleken om tot de optimale keuze te komen?*

2 EIGENSCHAPPEN VAN DE WAPENINGSVARIANTEN

Dit onderdeel van het rapport beschrijft eigenschappen van de wapeningsvarianten. Allereerst wordt uitgelegd wat de twee wapeningsvarianten zijn. Vervolgens wordt ingegaan op productieprocessen, toepassingen, gebruikelijke overspanningen, verhouding tussen doorsnedehoogte en overspanning en uiteindelijk kosten.

2.1 TRADITIONEEL GEWAPEND BETON

De drie meest gebruikte bouwmaterialen waaruit de civieltechnische constructies zijn opgebouwd, zijn hout, staal en beton. Lichtgewicht materialen zoals aluminium en kunststoffen komen ook steeds vaker voor in gebruik. Gewapend beton is uniek omdat twee materialen, wapeningsstaal en beton, samen worden gebruikt. De positieve eigenschappen van alle twee materialen worden hierdoor als het ware samengevoegd. Het beton is goed bestand tegen drukkrachten, terwijl het wapeningsstaal trekkrachten kan opnemen. Zie figuur 2.1 ter verduidelijking. De wapening wordt in dit soort beton passief gebruikt: krachtenopname begint pas als het beton gescheurd is.



Figuur 2.1 - Spanningen in gewapend beton na het scheuren

De verhouding tussen de doorsnedehoogte en overspanning bij gewapend beton is relatief groot vergeleken met voorgespannen beton, namelijk ongeveer 1/20 (gebaseerd op vuistregels van ervaren Sweco constructeurs). Dit zorgt ervoor dat de overspanning niet al te groot kan zijn. Het gewicht van een balk of een plaat loopt namelijk heel snel op en kan de belastingen die daarop werken, overheersen.

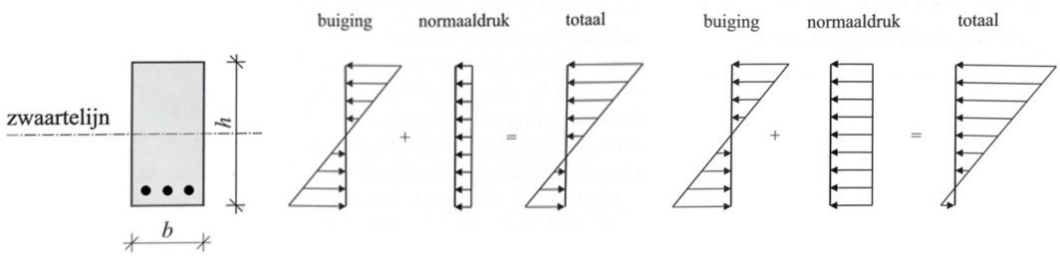
In de bruggenbouw wordt gewapend beton voornamelijk in het werk gestort, waardoor de uiteindelijke producten in willekeurige vormen en afmetingen gemaakt kunnen worden. Het nadeel van dit soort productieproces is dat de omstandigheden op de bouwplaats niet helemaal controleerbaar zijn, wat ongunstige gevolgen heeft voor de betonkwaliteit.

Vergeleken met voorgespannen beton is gewapend beton een relatief goedkoop bouwmateriaal. Vooral door het feit dat er voor de productie van dit soort beton minder wapeningsstaal (die ook nog eens een lagere treksterkte heeft) gebruikt wordt en doordat dit staal niet voorgespannen wordt. Daarnaast wordt vaak met een lagere sterkteklasse beton gewerkt.

Om bovenstaande redenen is de toepassing van gewapend beton beperkt. Het gewapend beton wordt toch door zijn voordelen veel toegepast in constructies zoals bruggen, viaducten, gebouwen, keermuren, tunnels en andere onder een voorwaarde dat de overspanning niet al te groot wordt. Later in het verslag wordt ingegaan op de getalswaarde van deze grens.

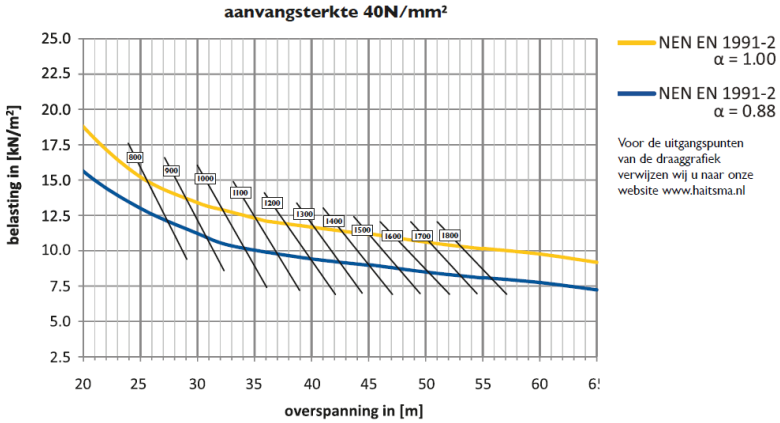
2.2 VOORGESPANNEN BETON

Het voorgespannen beton is een speciale toepassing van gewapend beton: een deel van de wapening wordt voorgespannen. De liggers waarin voorgespannen wapening gebruikt wordt, ondervinden normaaldruk voordat belastingen daarop beginnen te werken. De wapening is in dit geval dus actief. De bedoeling is dat nergens in de ligger trekspanningen optreden (zie figuur 2.2), zodat er geen haarscheuren in het beton ontstaan en de totale betondoorsnede werkzaam kan blijven. Op deze manier wordt het materiaal optimaal benut.

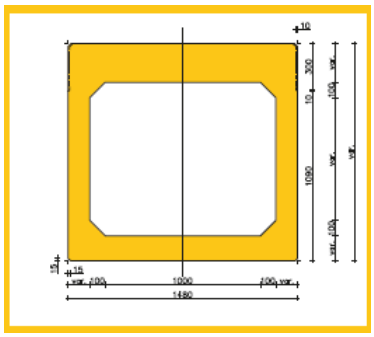


Figuur 2.2 - Spanningen in voorgespannen beton

Zoals vermeld in vorige paragraaf, is de verhouding tussen de doorsnedehoogte en overspanning bij voorgespannen beton relatief klein vergeleken met traditioneel gewapend beton. Voorbeeld van een voorgespannen prefab ligger is een HKP-ligger. Zie figuur 2.3. Voor deze ligger is aan de hand van figuur 2.3 bepaald dat die verhouding ongeveer gelijk is aan 1/30. Dit betekent dat dezelfde overspanning gehaald kan worden met een kleinere doorsnede.



Figuur 3.3 - Ontwerpgrafiek van een HKP-ligger



Figuur 3.4 – HKP - ligger

De voorgespannen betonliggers worden vaak in prefab beton uitgevoerd. Door de ideale beheersing van de omstandigheden in een fabriek kan het prefab beton met een hoge productiesnelheid en kwaliteit worden geproduceerd. De afmetingen en het gewicht van de eenheden die gemaakt zijn, zijn echter begrensd vanwege transport en hijsoperaties. Ook moeten die eenheden vervolgens op de bouwplaats aan elkaar verbonden worden.

Voor de productie van voorgespannen beton is voorspanstaal met een grotere treksterkte nodig. Ook wordt met hogere betonsterkteklasse gewerkt. Als gevolg hiervan is het gebruik van voorgespannen beton voor bruggen met een kleine overspanning duurder dan traditioneel gewapend beton.

Omdat het voorgespannen beton relatief duur is, moet er eerst gekeken worden of andere alternatieven zoals traditioneel gewapend beton niet toepasselijk zijn. Als blijkt dat alle twee opties mogelijk zijn, moet de ontwerper een afweging maken tussen alle voor- en nadelen. Meestal wordt het voorgespannen beton pas voor wat grotere overspanningen gebruikt. Later in het verslag wordt ingegaan op de getalswaarde van deze grens.

3 BELASTINGEN

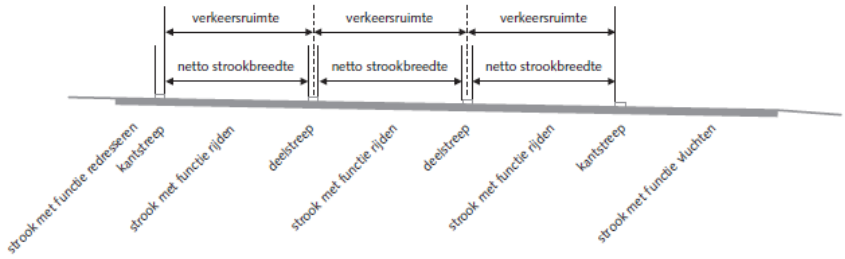
Dit deel van het document geeft informatie over hoe de viaductplaat verdeeld wordt en hoe de effecten van het verkeer weergegeven kunnen worden. De gevonden waarden worden verwerkt in een figuur die een basis vormt voor het SCIA model.

3.1 DWARSPROFIELONTWERP

Aangenomen wordt dat de viaduct die ontworpen wordt, een onderdeel is van een doorlopende snelweg. Volgens de Nieuwe Ontwerprichtlijn Autosnelwegen van Rijkswaterstaat valt dit stuk van de weg onder categorie 'hoofdbaan'. De stroken van een hoofdbaan kunnen volgende functies hebben: rijden, vluchten of redresseren. Aan die functies zijn minimale standaardwaarden voor de strookbreedtes gekoppeld.

Het dwarsprofiel is in dit rapport opgebouwd uit rijstroken met verschillende functies. De linker strook heeft als functie redresseren, de middelste rijstroken – rijden en de rechter strook – vluchten. Deze algemene indeling is in figuur 3.1 weergegeven. Aan de hand van tabel 3.1 in de bijlages kunnen de minimale strookbreedtes bepaald worden. Als de ontwerpsnelheid van 120 km/h aangenomen wordt, zijn de breedtes van links naar rechts zijn gelijk aan 0,60; 3,35 en 3,15 meter.

Onafhankelijk van de in tabel gevonden waardes geldt dat voor de functie rijden per rijstrook 3,50 meter voor het verkeer beschikbaar moet zijn. De European Agreement on Main International Traffic Arteries heeft in de internationale regelgeving vastgesteld dat deze ruimte nodig is voor de benodigde bewegingen binnen de eigen rijstrook.



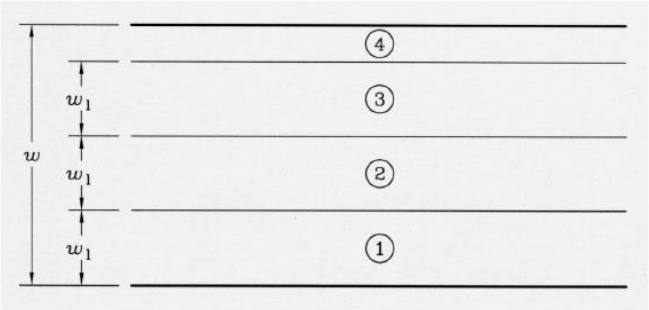
Figuur 3.1 - Verband tussen de verkeersruimte en de netto strookbreedte

3.2 INDELINGEN VAN EEN RIJWEG IN THEORETISCHE RIJSTROKEN

Voor de toetsing van de plaatligger is het nodig om een andere verdeling te maken, namelijk in theoretische rijstroken zoals weergegeven in figuur 3.2. In de Eurocode staat voorgeschreven op welke manier dat moet gebeuren en hoe breed de rijstroken moeten zijn. De rijstrook die het meest ongunstige effect geeft, wordt met rijstrook nummer 1 aangeduid; de rijstrook die het op een na ongunstigste effect geeft, wordt met rijstrooknummer 2 aangeduid, enz.

Voor iedere afzonderlijke toetsing, UGT of BGT, moeten verschillende combinaties van het aantal rijstroken dat als belast wordt meegenomen, hun positionering op de rijweg en hun nummering onderzocht worden. Op deze manier wordt duidelijk wat de maatgevende situatie is waarbij de doorsnedekrachten het grootst zijn.

Aangenomen wordt dat het fictieve viaduct 3 rijstroken per rijrichting heeft. De totale breedte van de rijweg, w, wordt daarom geschat op 10 meter. Uit tabel 3.2 kan afgelezen worden dat de breedte van een theoretische rijstrook, w_l, gelijk moet zijn aan 3 meter. De breedte van het resterende oppervlak wordt hierdoor 1 meter.



Figuur 3.2 – Nummering van de rijstroken in het meest algemene geval

Breedte van de rijweg w	Aantal theoretische rijstroken	Breedte van een theoretische rijstrook w_l	Breedte van het resterende oppervlak
$w < 5{,}4$ m	$n_1 = 1$	3 m	$w - 3$ m
$5{,}4 \text{ m} \leq w < 6$ m	$n_1 = 2$	$\frac{w}{2}$	0
$6 \text{ m} \leq w$	$n_1 = Int\left(\frac{w}{3}\right)$	3 m	$w - 3 \times n_1$
OPMERKING Bijvoorbeeld geldt voor een breedte van de rijweg gelijk aan 11 m, dat: $n_1 = Int\left(\frac{w}{3}\right) = 3$ *) en dat de breedte van het resterende oppervlakte gelijk is aan: 11 – 3×3 = 2m.			

Tabel 3.2 – Aantal en breedte van de theoretische rijstroken

3.3 VERKEERSBELASTING

Deze paragraaf geeft informatie over de belastingsmodellen die toegepast moeten worden op de ontworpen constructie. De belastingen die daarbij horen, worden vervolgens uitgewerkt met correctiefactoren.

3.3.1 Belastingsmodellen

In de Eurocode zijn vier belastingsmodellen ontwikkeld waarmee de effecten van het verkeer weergegeven kunnen worden.

Belastingsmodel 1 (BM1): geconcentreerde en gelijkmatig verdeelde belastingen, die het merendeel van de effecten van vracht- en personenautoverkeer afdekken. Dit model behoort te zijn gebruikt voor de algemene en lokale toetsingen.

Belastingsmodel 2 (BM2): één enkele aslast met specifieke contactoppervlakten van de wielen, waardoor de dynamische effecten van gangbaar verkeer op gedrongen constructieve elementen worden afgedekt.

Belastingsmodel 3 (BM3): een stelsel van samenstellingen van aslasten, die model staan voor bijzondere voertuigen (bijv. voor industriële transporten) die routes volgen waarvoor uitzonderlijk belastingen zijn toegestaan. Het model is bestemd voor algemene en lokale toetsingen.

Belastingsmodel 4 (BM4): belasting door een mensenmenigte, alleen bedoeld voor het uitvoeren van algemene toetsingen.

Alleen belastingsmodel 1 is in dit verslag van belang. De belastingen die bij dit model horen, moeten op iedere rijstrook over een dusdanige lengte en op een zodanige positie in de lengterichting zijn toegepast, dat voor iedere afzonderlijke toetsing het meest ongunstige effect wordt verkregen. Hetzelfde geldt voor de resterende oppervlakten.

Belastingsmodel 1 bestaat uit twee delen: geconcentreerde dubbele lasten en gelijkmatig verdeelde belastingen. Die belastingen worden verkregen door vermenigvuldiging met de veiligheidsfactoren α_Q en α_q.

Geconcentreerde dubbele aslasten:	$\alpha_Q Q_k$
Gelijkmatig verdeelde belastingen:	$\alpha_q q_k$

De waarden van de belastingen worden voor het theoretische rijstrook nummer i aangeduid als $\alpha_{Qi}Q_{ik}$ en $\alpha_{qi}q_{ik}$. Voor de resterende oppervlakten is dat $\alpha_{qr}q_{rk}$.

In het geval dat een rijweg drie of meer theoretische rijstroken heeft met meer dan 2.000.000 vrachtwagens per jaar per rijstrook voor zwaar verkeer geldt dat $\alpha_{Q1} = \alpha_{Qi} = 1$, $\alpha_{q1} = 1{,}15$ en $\alpha_{qi} = 1{,}40$ voor elke overspanning dan ook. Echter, wordt voor het gemak aangenomen dat die factoren gelijk aan 1 zijn.

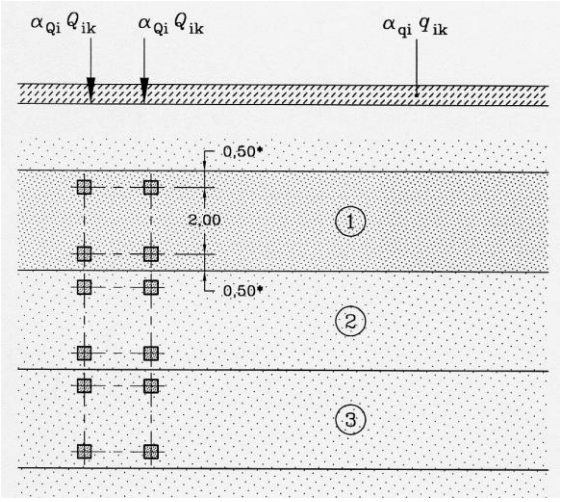
In tabel 3.3 kunnen de karakteristieke waarden van Q_k en q_k gevonden worden.

Positie	Tandemstelsel *TS*	Gelijkmatig verdeelde belasting (GVB)
	Aslast Q_{ik} (kN)	q_{ik} (of q_{rk}) (kN/m^2)
Rijstrook nummer 1	300	9
Rijstrook nummer 2	200	2,5
Rijstrook nummer 3	100	2,5
Overige rijstroken	0	2,5
Resterende oppervlakte (q_{rk})	0	2,5

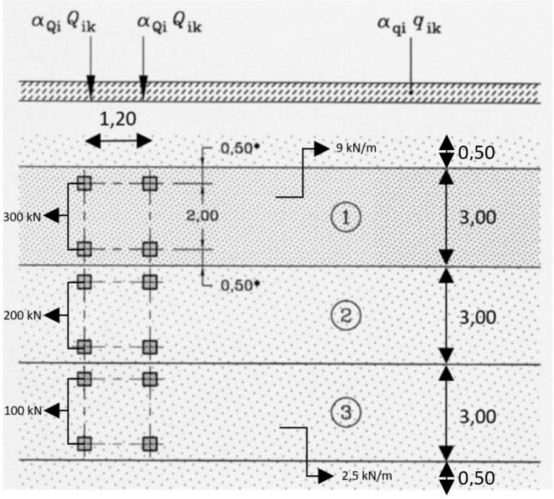
Tabel 3.3 – Belastingsmodel 1: karakteristieke waarden

Figuur 3.3 geeft weer hoe belastingsmodel 1 toegepast moet worden. Per theoretische rijstrook behoort niet meer dan één tandemstelsel in rekening te worden gebracht. Dat tandemstelsel hoort ook in het midden van zijn theoretische rijstrook te staan. Voor het contactoppervlak van een wiel kan worden uitgegaan van een vierkant met zijden van 0,4 m.

Voor overspanningen groter dan 10 m, kan ieder tandemstelsel op iedere rijstrook vervangen worden door een enkele aslast, waarvan de geconcentreerde belasting gelijk is aan de totale belasting door beide assen.



Figuur 3.3 – Toepassing van belastingsmodel 1



Figuur 3.4 – Toepassing van belastingsmodel 1

3.3.2 Uitwerking met correctiefactoren

De waarden van correctiefactoren en belastingen worden nu in de formules van de vorige paragraaf ingevuld. In het volgende hoofdstuk worden deze waarden gebruikt bij het modelleren van het viaduct en in de hoofdstukken daarna bij de toetsingen van de doorsnedes.

Theoretische rijstrook nummer 1:
$\alpha_{Q1}Q_{1k}$ = 1 * 300 kN = 300 kN
$\alpha_{q1}q_{1k}$ = 1 * 9 kN/m = 9 kN/m^2

Theoretische rijstrook nummer 2:
$\alpha_{Q2}Q_{2k}$ = 1 * 200 kN = 200 kN
$\alpha_{q2}q_{2k}$ = 1 * 2,5 kN/m = 2,5 kN/m^2

Theoretische rijstrook nummer 3:
$\alpha_{Q3}Q_{3k}$ = 1 * 100 kN = 100 kN
$\alpha_{q3}q_{3k}$ = 1 * 2,5 kN/m = 2,5 kN/m^2

Resterend oppervlak:
$\alpha_{qr}q_{rk}$ = 1 * 2,5 kN/m = 1,25 kN/m^2

De verkregen getallen zijn verwerkt in figuur 3.4. Bij deze getallen is nog geen rekening gehouden met de belastingsfactoren. De belastingsfactoren zijn afhankelijk van verschillende gevolgklassen: CC1, CC2 en CC3.

Al eerder in het verslag is aangenomen dat het viaduct een onderdeel van doorlopende snelweg is. Bij het instorten van het viaduct is de kans groot dat mensen omkomen. Daarnaast heeft het bezwijken van de constructie nadelige gevolgen voor de economie en het milieu. Om bovenstaande redenen valt het viaduct onder categorie CC3. De bijbehorende belastingscombinaties zijn hieronder weergegeven.

$$\begin{cases} \sum_{j\geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} \text{"+"} \gamma_P P \text{"+"} \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1} \text{"+"} \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \\ \sum_{j\geq 1} \xi_j \gamma_{G,j} G_{k,j} \text{"+"} \gamma_P P \text{"+"} \gamma_{Q,1} Q_{k,1} \text{"+"} \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \end{cases}$$

Figuur 3.5 – Belastingscombinaties voor blijvende of tijdelijke ontwerpsituaties

Bij de eerste belastingscombinatie is het eigen gewicht maatgevend en bij de tweede belastingscombinatie is dat de variabele belasting. De waarden van ξ, γ en ψ kunnen in tabellen 3.4 en 3.5 gevonden worden.

Hieronder zijn de belastingscombinaties met belastingsfactoren uitgewerkt. Bij de BGT toets wordt de doorbuiging voor het gemak ook met de frequente belasting gecheckt.

UGT eerste belastingscombinatie bruggen CC3:	1,4 * G + 1,2 * Q γ_G = 1,4, γ_Q = 1,5, ψ = 0,8
UGT tweede belastingscombinatie bruggen CC3:	1,25 * G + 1,5 * Q γ_G = 1,4, ξ = 0,89, γ_Q = 1,5
BGT belastingscombinatie bruggen CC3:	1,0 * G + 0,8 * Q γ_G = 1,0, γ_Q = 1,0, ψ = 0,8

De grootste doorsnedekrachten die in de constructie ontstaan als gevolg van deze belastingscombinaties, kunnen bij de BGT en UGT toets gebruikt worden.

4 BALKROOSTER

Om het bekende studiemateriaal te kunnen gebruiken, wordt de plaatligger in dit verslag gemodelleerd als een balkrooster. Hiervoor moet eerst gekeken worden naar de opleggingen en soorten verbindingen tussen de balken. Vervolgens kan dat schema samen met de verkeersbelastingen uit vorig hoofdstuk worden gebruikt om een model te maken in SCIA. Aan de hand van dit programma kan uiteindelijk bepaald worden wat de grootste doorsnedekrachten zijn.

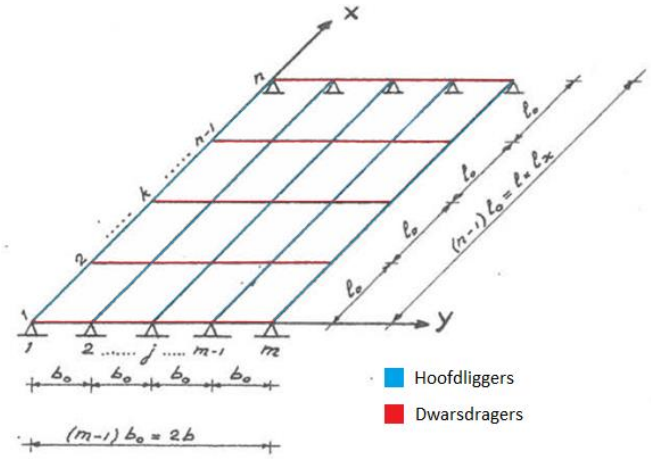
4.1 SCHEMATISERING

Bij een balkroosterbrug spreekt men van hoofdliggers en dwarsdragers die orthogonaal en onderling evenwijdig zijn. Figuur 4.1 laat een algemene schema voor zulke bruggen zien. De hoofdliggers zijn daarin aan beide einden scharnierend opgelegd en momentvast verbonden aan dwarsdragers. De scharnieren kunnen alleen verticale (en horizontale) trek- of drukkrachten overbrengen. Bij de momentvaste verbinding kunnen daarnaast nog buigende en wringende momenten overgebracht worden; wringende momenten in de ene balk veroorzaken buigende momenten in de andere, en omgekeerd.

4.1.1 Afmetingen

In paragraaf 3.2 staat dat de breedte van een theoretische rijstrook gelijk is aan 3 meter en dat de breedte van het resterende oppervlak 1 meter is. Verder kunnen uit figuur 3.3 afstanden tussen de wielen in lengte- en dwarsrichting gehaald worden: deze zijn respectievelijk 1,20 en 2,00 meter. Een b_0 van 1 meter en l_0 van 1,2 meter waarbij het resterend oppervlak verdeeld wordt over beide kanten van de weg is hier de handigste keuze. Op deze manier werken de wiellasten namelijk op de knopen van het model.

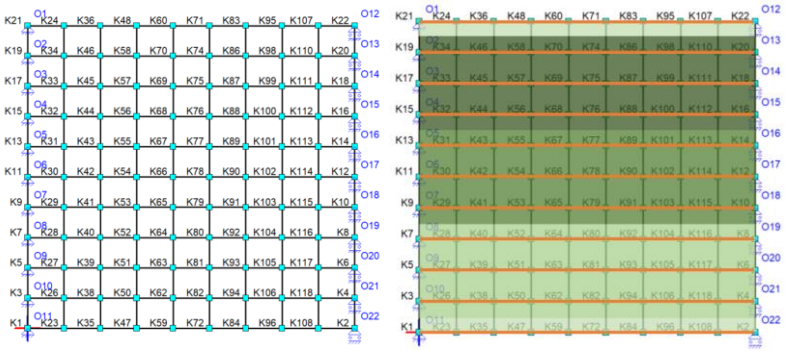
Om uit te zoeken bij welke overspanning de overgang van wapeningsvariant plaatsvindt, wordt de overspanning van het rooster telkens gewijzigd terwijl de totale breedte constant blijft.



Figuur 4.1 - Schema balkrooster

4.1.2 Van gelijkmatig verdeelde belasting naar lijnlasten

De verkeersbelastingen die op het viaduct werken zijn in paragraaf 3.3.2 gegeven. Nu de afstanden tussen de hoofdliggers bekend zijn, kunnen gelijkmatig verdeelde belastingen omgezet worden naar lijnlasten. De lijnlasten zijn gelijk aan gelijkmatig verdeelde belastingen (op de eenheden na) omdat de hoofdliggers telkens 1 meter aan belastingen in de breedte opnemen. Voor de uiterste liggers is dat 0,5 meter. Ter verduidelijking zijn de hoofdliggers samen met gelijkmatig verdeelde belasting per rijstrook in figuur 4.2 weergegeven.



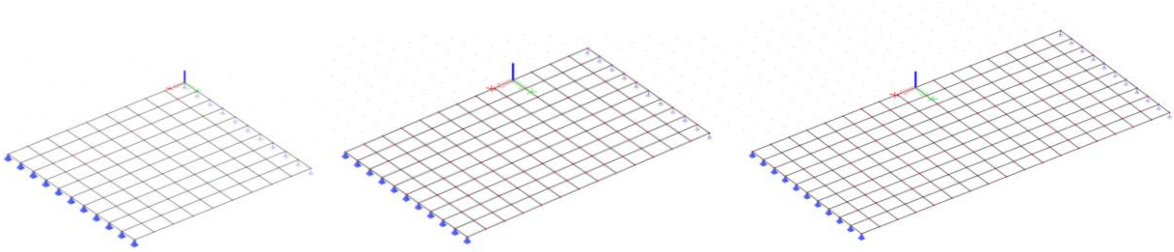
Figuur 4.2 – Gelijkmatig verdeelde belasting per hoofdligger

4.2 MODEL

Het balkrooster wordt als een 3D-raamwerk gemodelleerd in SCIA. Er worden drie modellen gemaakt met verschillende overspanning, namelijk 10,8; 15,6 en 20,4 meter. Deze lengtes zijn een meervoud van 1,2 meter (afstand tussen de wielen in lengterichting) en zijn zo gekozen, dat de puntlasten precies in het midden van de constructie komen. Voor alle drie modellen wordt bepaald wat de maatgevende doorsnedekrachten zijn. Om een realistische waarde te krijgen, wordt naast de verkeersbelastingen ook het eigen gewicht meegenomen.

In paragraaf 2.1 staat dat de verhouding tussen de doorsnedehoogte en overspanning bij gewapend beton ongeveer 1/20 is. Dat betekent dat de eerste schattingen van de hoogtes afgerond kunnen worden naar 0,55; 0,8 en 1,0 meter. De breedte moet voor alle overspanningen gelijk zijn aan 1 meter, zodat de ruimte tussen de hoofdliggers gevuld wordt en het balkrooster daardoor op een plaat lijkt. Het is belangrijk om daarbij de massa van de dwarsdragers op 0 te stellen zodat het eigen gewicht niet dubbel meegenomen wordt.

De drie modellen zijn te zien in onderstaande figuur.



Figuur 5.3 – SCIA modellen met verschillende overspanningen

4.2.1 Maatgevende belastingscombinaties

Elke belastingscombinatie bestaat uit belastingsgevallen die eventueel vermenigvuldigd worden met een belastingsfactor. Er wordt rekening gehouden met drie belastingsgevallen: puntlasten, gelijkmatig verdeelde belasting en eigen gewicht. Om de grootste doorsnedekrachten te bepalen, worden verschillende combinaties van die belastingsgevallen gemaakt. De belastingscombinaties die in het model worden gebruikt, zijn hieronder weergegeven.

De puntlasten worden in het midden van de hoofdliggers geplaatst om het grootste buigend moment te bepalen. Voor de grootste dwarskracht moeten ze aan het uiteinde gezet worden. De overige belastingen veranderen niet van plaats.

Belastingscombinatie 1:	1.25 * eigen gewicht + 1,5 * (puntlasten in het midden + gelijkmatig verdeelde belasting met rijstrook 1 aan de zijkant)
Belastingscombinatie 2:	1.25 * eigen gewicht + 1,5 * (puntlasten aan het uiteinde + gelijkmatig verdeelde belasting met rijstrook 1 aan de zijkant)
Belastingscombinatie 3:	1.4 * eigen gewicht + 1,2 * (puntlasten in het midden + gelijkmatig verdeelde belasting met rijstrook 1 aan de zijkant)
Belastingscombinatie 4:	1.4 * eigen gewicht + 1,2 * (puntlasten aan het uiteinde + gelijkmatig verdeelde belasting met rijstrook 1 aan de zijkant)
Belastingscombinatie 5:	1,0 * eigen gewicht + 0,8 * (puntlasten in het midden + gelijkmatig verdeelde belasting met rijstrook 1 aan de zijkant)
Belastingscombinatie 6:	1,0 * eigen gewicht + 0,8 * (puntlasten aan het uiteinde + gelijkmatig verdeelde belasting met rijstrook 1 aan de zijkant)

4.2.2 Maximale doorsnedekrachten

De maatgevende doorsnedekrachten zijn per overspanning in tabel 4.1 verwerkt. De bijbehorende krachtenverloop is terug te vinden in de bijlage.

L [m]	h [m]	b [m]	UGT		BGT	
			M_{Ed} [kNm]	V_{Ed} [kN]	M_{Ed} [kNm]	V_{Ed} [kN]
10,8	0,55	1,0	825,7	352,6	513,1	215,2
15,6	0,8	1,0	1645,2	483,7	1086,7	313,8
18	0,9	1,0	2154,8	558,1	1450,6	370,6
20,4	1,0	1,0	2843,7	630,4	1954,6	425,9

Tabel 4.1 – Maatgevende doorsnedekrachten per overspanning

Belastingscombinaties 1 en 5 geven de grootste buigende momenten M_{Ed} voor respectievelijk UGT en BGT. Voor de grootste dwarskrachten V_{Ed} zijn dat respectievelijk belastingscombinaties 2 en 6.

5 UITERSTE GRENSTOESTAND

Om te kijken of de aangenomen doorsnedes de maatgevende krachten en momenten kunnen opnemen, moet een UGT-toets uitgevoerd worden. De focus wordt in dit hoofdstuk vooral gelegd op langswapening en dwarskrachtwapening. Eerst worden de berekeningen toegelicht en daarna opgelost in Python.

5.1 REKENWAARDEN BETON EN STAAL

Beton C30/37

Rekenwaarde van druk- en treksterktes (tabellen 5.1 en 5.2)

$f_{cd} = \alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_c$
$\alpha_{cc} = 1{,}00$
$f_{ck} = 30$ MPa
$\gamma_c = 1{,}5$
$f_{cd} = 30 / 1{,}5 = 20$ MPa

$f_{ctd} = \alpha_{ct} f_{ctk,0,05} / \gamma_c$
$\alpha_{ct} = 1{,}00$
$f_{ctk,0,05} = 2{,}0$ MPa
$\gamma_c = 1{,}5$
$f_{ctd} = 2{,}0 / 1{,}5 = 1{,}33$ MPa

Betonstaal FeB500B

Rekenwaarde van treksterkte (tabellen 5.2 en 5.3)

$f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s$
$f_{yk} = 500$ MPa
$\gamma_s = 1{,}15$
$f_{yd} = 500 / 1{,}15 = 435$ MPa

5.2 MINIMALE DEKKING

Milieuklasse XC4 en constructieklasse S4

Minimale dekking (tabellen 5.4 en 5.5)

$c_{min} = \max [c_{min,b}; c_{min,dur} + \Delta c_{dur,\gamma} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add}; 10 \text{ mm}]$
$\Delta c_{dur,\gamma} = \Delta c_{dur,st} = \Delta c_{dur,add} = 0$
$c_{min} = 30 \text{ mm} = c$

5.3 EERSTE SCHATTINGEN

Doorsnede

Hoogte x breedte

550 mm x 1000 mm
800 mm x 1000 mm
1000 mm x 1000 mm

Diameters wapening

$Ø_{wapening} = 32$ mm
$Ø_{beugel} = 16$ mm

Overig

$z = 0{,}9\ d$
$d = h - c - Ø_{beugel} - ½\ Ø_{wapening}$

5.4 BUIGING

Het eerste deel van de uiterste grenstoestand toets is buiging. Hierin wordt gecontroleerd of de benodigde hoeveelheid wapening voor opnemen van het buigend moment kwijt kan in de doorsnede.

5.4.1 Controle op dimensionering balk

In de maatgevende doorsnede dient het uitwendig rekenmoment (M_{Ed}) door de doorsnede te kunnen worden opgenomen, dus:

$$M_{Ed} \leq M_{Rd}$$

Het inwendige moment moet worden geleverd door de betondrukkracht N_b en de staaltrekkracht N_s. Uit de evenwichtsvoorwaarde $\Sigma H = 0$ volgt:

$$N_c = N_s$$
$$N_s = M_{Ed} / z$$

Controle maximale wapeningsverhouding door middel van berekening van de hoogte van de betondrukzone (x_u).

$$x_u = N_c / (\alpha\ b\ f_{cd})$$
$$\alpha = 0{,}75$$
$$f_{cd} = 20\ \text{MPa}$$

De maximale hoogte van de betondrukzone wordt bepaald aan de hand van de voorwaarde dat maximale wapeningsverhouding wordt gebruikt.

$$\delta \geq k_1 + k_2\ x_u / d$$

Zonder herverdeling wordt dit:

$$\delta = k_1 + k_2\ x_u / d$$
$$\delta = 1$$
$$k_1 = 0{,}44$$
$$k_2 = 1{,}25\ (0{,}6 + 0{,}0014 / \varepsilon_{cu2})$$
$$\varepsilon_{cu2} = 3{,}5\ ‰ = 0{,}0035$$

Hieruit volgt dat:

$$x_{u,max} = 0{,}448\ d$$

Deze waarde moet vergeleken worden met x_u die eerder bepaald is. Aan de hand van de berekende waarden wordt bepaald of drukwapening toegepast moet worden.

5.4.2 Minimumoppervlakte van betonstaal

De minimumoppervlakte van betonstaal wordt verkregen wanneer het scheurmoment gedeeld wordt door de hefboomsarm en vloeispanning:

$$A_{s,min} = M_{rep} / (z_s\ f_{yd})$$

Waarin:

$$M_{rep} = W\ f_{ctm} = 1/6\ b\ h^2\ f_{ctm}$$
$$f_{ctm} = 2{,}9\ \text{MPa}$$

5.4.3 Berekening benodigde hoeveelheid buigwapening

Hier wordt de hefboomsarm niet meer geschat maar uitgerekend.

$$M_{Rd} = N_{cu}\ z$$
$$N_{cu} = \alpha\ f_{cd}\ b\ x_u$$

$z = d - \beta x_u$
$\beta = 0{,}389$

Hieruit volgt weer x_u. Als deze waarde kleiner is dan de maximale hoogte van de betondrukzone, dan wordt de maximale drukkracht in het beton:

$N_{cu} = \alpha f_{cd} b x_{u,max}$

Het bijbehorende moment is:

$M_{Rd} = N_{cu} z = \alpha f_{cd} b x_{u,max} z$
$A_{s,nodig} = M_{Ed} / (z f_{yd})$

In tabel 5.6 staan de gezamenlijke doorsnedes van betonstaalstaven in mm^2.

In plaats van deze omslachtige manier kan ook gebruik gemaakt worden van de ontwerptabel 5.7 in de bijlage.

Als de toegepaste wapeningsverhouding groter is dan de minimum wapeningsverhouding, dan geldt: $M_{Rd} \geq M_{rep}$. In dat geval zal geen brosse breuk optreden.

5.4.4 Controle of de hoeveelheid wapening wel kwijt kan in de doorsnede

De minimale afstand tussen hoofdwapeningsstaven (tabel 6.8) wordt gegeven door:

$a = \max[Ø_{wapening}; D + 5; 20 \text{ mm}]$
$D = 31{,}5 \text{ mm}$
$a = \max[25 \text{ mm}; 36{,}5 \text{ mm}; 20 \text{ mm}] = 36{,}5 \text{ mm}$

D is de korrelafmeting die in het beton wordt gebruikt.

De maximale diameter van wapeningsstaven kan in tabel 5.9 gevonden worden.

5.5 DWARSKRACHT

Het tweede deel van de uiterste grenstoestand toets is dwarskracht. Hierin wordt gecontroleerd of de dwarskrachtcapaciteit van de beugels groter is dan de optredende dwarskracht.

5.5.1 Controle dwarskracht zonder wapening

In sommige gevallen is de dwarskrachtweerstand van beton groot genoeg waardoor de beugels niet toegepast hoeven te worden. De ondergrens van dwarskrachtweerstand van deze elementen is:

$V_{Rd,c} = (v_{min} + k_1 \sigma_{cp}) b_w d$
$v_{min} = 0{,}035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2}$
$k = 1 + (200 / d)^{1/2} \leq 2{,}0$
$\sigma_{cp} = N_{Ed} / A_c < 0{,}2 f_{cd}$

De dwarskrachtweerstand van het beton $V_{Rd,c}$ wordt gegeven door:

$V_{Rd,c} = [C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp}] b_w d$
$C_{Rd,c} = 0{,}12$
$\rho_l = A_{sl} / (b_w d)$
$\sigma_{cp} = N_{Ed} / A_c = 0$

De waarden voor $C_{Rd,c}$, v_{min} en k_1 moeten zijn ontleend aan 6.2.2 (1) van NEN-EN 1992-1-1 C2-2011 NB.

$C_{Rd,c} = 0{,}12$
$k_1 = 0{,}15$

Als $V_{Rd,c} \leq V_{Ed}$ moeten beugels toegepast worden.

5.5.2 Berekening dwarskrachtwapening

Voor elementen met verticale dwarskrachtwapening is de dwarskrachtweerstand V_{Rd} de kleinste waarde van:

De hoek θ kan worden gekozen tussen de grenzen 21.8° en 45° (cotθ = 2.5 resp. 1.0).

$A_{sw} / s = V_{Ed} / (z \cot\theta \, f_{yd})$
$A_{sw} = 2 \, ¼ \, \pi \, Ø_{beugel}^2$
$z = 0{,}9 \, d$

Hieruit volgt s. De maximale beugelafstand in de langsrichting mag niet groter zijn dan:

$s_{t,max} = 0{,}75 \, d \leq 600$ mm

De dwarskrachtverhouding wordt gegeven door:

$\rho_w = A_{sw} / (s \, b_w \sin\alpha)$

De dwarskrachtwapening behoort een hoek α tussen 45° en 90° met de lengte-as van het constructie element te maken.

De dwarskrachtwapening behoort niet kleiner zijn dan de volgende waarde:

$\rho_{w,min} = (0{,}08 \, f_{ck}^{1/2}) / f_{yk}$

5.5.3 Controle dwarskracht met wapening

Voor elementen met verticale dwarskrachtwapening is de dwarskrachtweerstand V_{Rd} de kleinste waarde van:

$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} \, b_w \, z \, v_1 \, f_{cd} / (\cot\theta + \tan\theta)$
$\alpha_{cw} = 1$
$v_1 = v$
$v = 0{,}6 \, (1 - f_{ck} / 250)$

en

$V_{Rd,s} = A_{sw} \, z \, f_{yd} \cot\theta / s$

De waarden van v_1 en α_{cw} worden volgens richtlijnen van NEN-EN 1992-1-1 deel 6.2.3 (3) gekozen.

De aanbevolen waarde van α_{cw} voor niet voorgespannen constructies is 1.

6 BRUIKBAARHEIDSGRENSTOESTAND

De betonelementen scheuren en vervormen onder invloed van de belastingen. Bij de BGT-toets wordt gecontroleerd of de scheurwijdte en doorbuiging die bij de ontworpen doorsnede horen de maximale waarden niet overschrijden. Eerst worden de berekeningen toegelicht en daarna opgelost in Python.

6.1 SCHEURBEHEERSING

De scheurwijdte w_k mag zijn berekend met vergelijking:

$$w_k = s_{r,max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$$
$$s_{r,max} = 1{,}3 (h - x)$$

Waarbij $\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$ berekend mag worden met:

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = (\sigma_s - k_t f_{ct,eff} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff}) / \rho_{p,eff}) / E_s \geq 0{,}6 \sigma_s / E_s$$
$$\sigma_s = M_{Ed} / (A_s * z)$$
$$k_t = 0{,}6$$
$$f_{ct,eff} = f_{ctm}$$
$$\alpha_e = E_s / E_{cm}$$
$$E_s = 210.000 \text{ MPa}$$
$$E_{cm} = 33.000 \text{ MPa}$$
$$\rho_{p,eff} = (A_s + \xi_1 A_p') / A_{c,eff}$$
$$A_p' = 0$$
$$A_{c,eff} = h_{c,eff} b$$
$$h_{c,eff} = \min(2{,}5 (h - d), (h - x) / 3, h / 2)$$

De berekende w_k moet kleiner zijn dan de toegelaten waarde van w_{max}.

Deze waarde kan in tabel 6.1 gevonden worden en is gelijk aan 0,3 mm.

Als de toegepaste betondekking groter is dan de nominale betondekking, mag de toelaatbare scheurwijdte met de volgende factor vermenigvuldigd worden:

$$k_x = c / c_{nom} \leq 2{,}0$$

6.2 DOORBUIGINGSCONTROLE

De grootste vervorming wordt voor elke overspanning met SCIA bepaald en vervolgens vergeleken met de toegestane waarde.

De toegestane waarde is 0,004 l (tabel 7.3) en kan teruggevonden worden in tabel 6.1.

L [m]	u_z [mm]	$u_{z,max}$ [mm]
10,8	12,9	43,2
15,6	18,9	62,4
18,0	23,8	72,0
20,4	30,1	81,6

Tabel 6.1 – (Maximale) doorbuiging per overspanning

7 UITWERKING

In dit hoofdstuk worden de berekeningen van vorige twee hoofdstukken uitgewerkt voor de doorsnedes van traditioneel gewapende liggers bij drie overspanningen. De verwachting is dat de doorsnede die bij 15,6 of 20,4 meter hoort, niet meer voldoet. Het optredend buigend moment neemt namelijk toe door een grotere overspanning en groter eigen gewicht. Dat moment moet opgenomen worden door het wapeningsstaal. De spanning in het staal moet daarbij ook binnen bepaalde grenzen blijven. Als de benodigde hoeveelheid wapeningsstaal niet meer in de doorsnede past, dan voldoet die niet.

Op het moment dat dit uitgezocht wordt, kan naar of 13,2 of 18 meter gekeken worden. Vervolgens wordt bestudeerd wat het gevolg is van het aanbrengen van sparingen op de plekken die nauwelijks bijdragen aan de buigend moment capaciteit.

Om de doorsnedes met elkaar te kunnen vergelijken, moeten sommige keuzes voor alle overspanningen vastgelegd worden. Zo wordt bij elke doorsnede gekozen voor 45 mm betondekking, 32 mm wapeningsstaven, 16 mm beugels en een rij wapeningsstaven. Deze beslissingen hebben gevolgen voor de maximale afstanden tussen de staven, maximale spanning in het wapeningsstaal en veel meer.

7.1 MASSIEVE DOORSNEDE

Eerst worden de berekeningen uitgevoerd voor een massieve doorsnede. Alleen de belangrijkste onderdelen worden gegeven. De volledige berekeningen kunnen in de bijlagen gevonden worden.

7.1.1 Overspanning 10,8 meter

Doorsnede

550 mm x 1000 mm

$Ø_{wapening}$ = 32 mm
$Ø_{beugel}$ = 16 mm

c = 45 mm

Uitwerking

A_s = 8042,5 mm^2 ⇨ 10 Ø32 wapeningsstaven
ρ = 1,7003 %

σ_s = 151,1 MPa ⇨ a_{max} = 300 mm
⇨ $Ø_{wapening,max}$ = 32 mm
a_{min} = 36,5 mm
a = 62,0 mm

U.C. = M_{Ed} / M_{Rd} = 0,56

A_{sw} = 402,1 mm^2
s = 523,5 mm
$s_{l,max}$ = 354,8 mm ⇨ beugels Ø16 - 200
ρ_{min} = 0,0864 %
ρ_w = 0,284 %

U.C. = V_{Ed} / V_{Rd} = 0,38

w_{max} = 0,45 mm
k_x = c / c_{nom} = 45 / 30 = 1,50
w_k = 0,2851 mm

$u_{z,max}$ = 43,2 mm
u_z = 12,9 mm

7.1.2 Overspanning 15,6 meter

Doorsnede

800 mm x 1000 mm

$Ø_{wapening}$ = 32 mm
$Ø_{beugel}$ = 16 mm

c = 45 mm

Uitwerking

A_s = 10455,2 mm^2 ⇨ 13 Ø32 wapeningsstaven
ρ = 1,4461 %

σ_s = 157,9 MPa ⇨ a_{max} = 300 mm
⇨ $Ø_{wapening,max}$ = 32 mm

a_{min} = 36,5 mm
a = 38,5 mm

U.C. = M_{Ed} / M_{Rd} = 0,51

A_{sw} = 402,1 mm^2
s = 594,8 mm
$s_{l,max}$ = 542,3 mm ⇨ beugels Ø16 – 225
ρ_{min} = 0,0876 %
ρ_w = 0,2528 %

U.C. = V_{Ed} / V_{Rd} = 0,38

w_{max} = 0,45 mm
k_x = c / c_{nom} = 45 / 30 = 1,50
w_k = 0,4380 mm

$u_{z,max}$ = 62,4 mm
u_z = 18,9 mm

7.1.3 Overspanning 20,4 meter

Doorsnede

1000 mm x 1000 mm

$Ø_{wapening}$ = 32 mm
$Ø_{beugel}$ = 16 mm

c = 45 mm

Uitwerking

A_s = 15280,7 mm^2 ⇨ 19 Ø32 wapeningsstaven
ρ = 1,6555 %

σ_s = 153,3 MPa ⇨ a_{max} = 300 mm
⇨ $Ø_{wapening,max}$ = 32 mm

a_{min} = 36,5 mm
a = 15,0 mm

U.C. = M_{Ed} / M_{Rd} = 0,51

A_{sw} = 402,1 mm^2
s = 578,7 mm
$s_{l,max}$ = 692,3 mm ⇨ beugels Ø16 - 225
ρ_{min} = 0,0876 %
ρ_w = 0,2528 %

U.C. = V_{Ed} / V_{Rd} = 0,39

w_{max} = 0,45 mm
k_x = c / c_{nom} = 45 / 30 = 1,50
w_k = 0,5399 mm

$u_{z,max}$ = 81,6 mm
u_z = 30,1 mm

Uit bovenstaande berekeningen blijkt dat de afstand tussen de wapeningsstaven te klein is en dat de scheurwijdte te groot is. De maximaal toegestane scheurwijdte kan nog groter worden als de betondekking groter wordt. In dat geval mag minder wapening gebruikt worden. Het probleem is echter dat de spanning in het wapeningsstaal daarbij hoger wordt. Dat betekent dat de staven met een diameter van 32 mm niet meer toegepast kunnen worden. Dan lukt het al helemaal niet meer om genoeg wapening in de doorsnede te plaatsen.

Op dit moment is duidelijk geworden dat het punt waarbij de doorsnede niet meer voldoet, tussen 15,6 en 20,4 meter ligt. In de volgende paragraaf wordt naar 18,0 meter gekeken, zodat dat scala nog kleiner wordt.

7.1.4 Overspanning 18,0 meter

Doorsnede

900 mm x 1000 mm

$Ø_{wapening}$ = 32 mm
$Ø_{beugel}$ = 10 mm

c = 60 mm
d = 823,0 mm
z = 748,3 mm

Uitwerking

A_s = 12868,0 mm^2 ⇨ 16 Ø32 wapeningsstaven
ρ = 1,5635 %

σ_s = 150,6 MPa ⇨ a_{max} = 300 mm
⇨ $Ø_{wapening,max}$ = 32 mm

a_{min} = 36,5 mm
a = 24,4 mm

U.C. = M_{Ed} / M_{Rd} = 0,55

A_{sw} = 402,1 mm^2
s = 586,1 mm
$s_{l,max}$ = 617,3 mm ⇨ beugels Ø16 - 225
ρ_{min} = 0,0876 %
ρ_w = 0,2528 %

U.C. = V_{Ed} / V_{Rd} = 0,38

w_{max} = 0,45 mm
k_x = c / c_{nom} = 45 / 30 = 1,50
w_k = 0,4719 mm

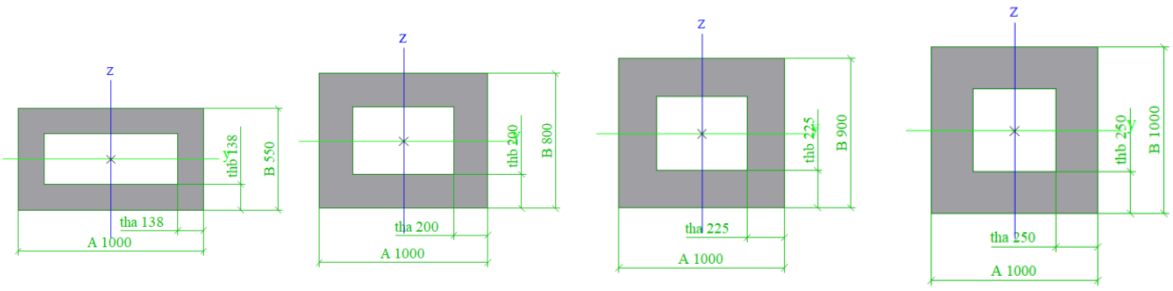
$u_{z,max}$ = 72,0 mm
u_z = 23,7 mm

Alweer kan dezelfde conclusie als in de vorige paragraaf getrokken worden. De afstand tussen de wapeningsstaven is namelijk nog steeds te klein en de scheurwijdte nog steeds te groot. Het punt waarbij de doorsnede niet meer voldoet, ligt dus ergens tussen 15,6 en 18 meter.

7.2 HOLLE DOORSNEDE

In deze paragraaf wordt een sparing in de doorsnede aangebracht om te bepalen wat de invloed daarvan is op de grootte van de overspanning. De belastingen die op de constructie werken, worden kleiner door besparing van het eigen gewicht. Dat zou kunnen betekenen dat de maximale overspanning die met deze doorsnede gehaald kan worden, groter is.

De hoogte en breedte van de doornsnede blijven ongewijzigd. Voor de verhouding tussen de dikte en hoogte van de doorsnede is ¼ gekozen. De nieuwe doorsnedes, in figuur 7.1 weergegeven, worden nu op sterkte, scheurwijdte en doorbuiging getoetst. Alleen de belangrijkste onderdelen worden gegeven. De berekeningen kunnen in de bijlagen gevonden worden.



Figuur 7.1 – Doorsnedes met sparingen

7.2.1 Overspanning 10,8 meter

A_s = 6434,0 mm^2 ⇨ 8 Ø32 wapeningsstaven
ρ = 2,3490 %

σ_s = 153,0 MPa
a = 88,9 mm

U.C. = M_{Ed} / M_{Rd} = 0,60

s = 604,3 mm
$s_{l,max}$ = 354,8 mm ⇨ beugels Ø16 – 225
ρ_w = 0,2528 %

U.C. = V_{Ed} / V_{Rd} = 0,37

w_{max} = 0,45 mm
w_k = 0,2782 mm

$u_{z,max}$ = 43,2 mm
u_z = 11,7 mm

7.2.2 Overspanning 15,6 meter

A_s = 8846,7 mm^2 ⇨ 11 Ø32 wapeningsstaven
ρ = 1,8316 %

σ_s = 148,8 MPa
a = 52,6 mm

U.C. = M_{Ed} / M_{Rd} = 0,5408

s = 712,0 mm
$s_{l,max}$ = 542,3 mm ⇨ beugels Ø16 – 250
ρ_w = 0,2275 %

U.C. = V_{Ed} / V_{Rd} = 0,35

w_{max} = 0,45 mm
w_k = 0,3863 mm

$u_{z,max}$ = 62,4 mm
u_z = 16,5 mm

7.2.3 Overspanning 20,4 meter

A_s = 12063,7 mm^2 ⇨ 15 Ø32 wapeningsstaven
ρ = 1,7925 %

σ_s = 156,4 MPa
a = 28,4 mm

U.C. = M_{Ed} / M_{Rd} = 0,54

s = 700,7 mm
$s_{l,max}$ = 692,3 mm ⇨ beugels Ø16 – 250
ρ_w = 0,2275 %

U.C. = V_{Ed} / V_{Rd} = 0,36

w_{max} = 0,45 mm
w_k = 0,5340 mm

$u_{z,max}$ = 81,6 mm
u_z = 26,2 mm

Uit bovenstaande berekeningen blijkt dat de afstand tussen de wapeningsstaven te klein is en dat de scheurwijdte te groot is. De resultaten van deze paragraaf zijn in ieder geval wel beter dan van paragraaf 7.1.3. Het eigen gewicht van de constructie is afgenomen waardoor de belasting die op de constructie werkt kleiner is geworden. Daarbij is de momentcapaciteit niet gewijzigd, omdat de hoogte van betondrukzone kleiner is dan de dikte van de doorsnede. Dit heeft als gevolg dat minder wapening nodig is voor het opnemen van het buigend moment en het laag houden van de staalspanning.

Op dit moment is duidelijk geworden dat het punt waarbij de doorsnede niet meer voldoet, tussen 15,6 en 20,4 meter ligt. In de volgende paragraaf wordt naar 18,0 meter gekeken, zodat dat scala nog kleiner wordt.

7.2.4 Overspanning 18 meter

A_s = 10455,2 mm^2 ⇨ 13 Ø32 wapeningsstaven
ρ = 1,8167 %

σ_s = 151,0 MPa
a = 38,5 mm

U.C. = M_{Ed} / M_{Rd} = 0,53

s = 712,6 mm
$s_{l,max}$ = 617,3 mm ⇨ beugels Ø16 – 250
ρ_w = 0,2275 %

U.C. = V_{Ed} / V_{Rd} = 0,35

w_{max} = 0,45 mm
w_k = 0,4524 mm

$u_{z,max}$ = 72,0 mm
u_z = 21,0 mm

Als voldaan wil worden aan de eis voor staalspanning en de afstand tussen de staven, wordt de scheurwijdte te groot. Dat betekent dat het punt waarbij de doorsnede niet meer voldoet, ergens tussen 15,6 en 18 meter ligt.

8 RESULTATEN

In dit deel van het verslag wordt een vergelijking gemaakt tussen de minimale en maximale overspanning van de twee wapeningsvarianten. Allereerst worden aan de hand van maatgevende waarden van vorig hoofdstuk ontwerpgrafieken voor traditioneel gewapende liggers opgesteld. Vervolgens wordt per grafiek gekeken naar de mogelijke verbanden tussen de variabelen en worden de bijbehorende functies gelijk gesteld aan de maximale waarden waardoor de maximale overspanning bekend wordt.

Aangezien de voorgespannen liggers in standaard maten uitgevoerd worden, zijn de ontwerpgrafieken al door de fabrikanten gemaakt. De minimale en maximale overspanning kan hierdoor meteen afgelezen worden.

8.1 TRADITIONEEL GEWAPENDE LIGGERS

Voor de traditioneel gewapende liggers worden de maatgevende resultaten van vorig hoofdstuk in figuren 8.1 en 8.2 tegen overspanning uitgezet om te kijken of er iets gezegd kan worden over het verloop van deze grafieken.

8.1.1 Massieve doorsnede

In figuren 8.1 en 8.2 is te zien dat de punten zich op een lijn bevinden die ongeveer recht is. Daarom wordt ook een aanname gedaan dat het verband tussen deze waarden lineair is. Als de functie van deze lijnen bepaald wordt, kan het exacte punt gevonden worden waarbij de doorsnede bij gegeven overspanning nog net voldoet.

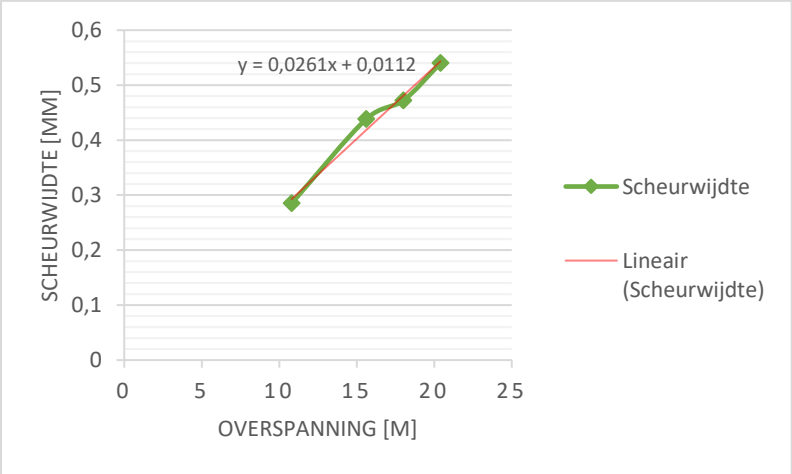
Om de doorsnedes met elkaar te kunnen vergelijken, is de betondekking bij elke overspanning constant gehouden. Dat betekent dat de k-factor ook constant is. De maximale scheurwijdte voor elke overspanning is daarmee 0,45 mm. Daarnaast geldt voor elke overspanning dat de minimale staafafstand gelijk is aan 36,5 mm.

De functies van de lijnen zijn met behulp van Excel opgesteld en moeten gelijk gesteld worden aan de maatgevende waarden van vorige alinea om de bijbehorende overspanning te krijgen.

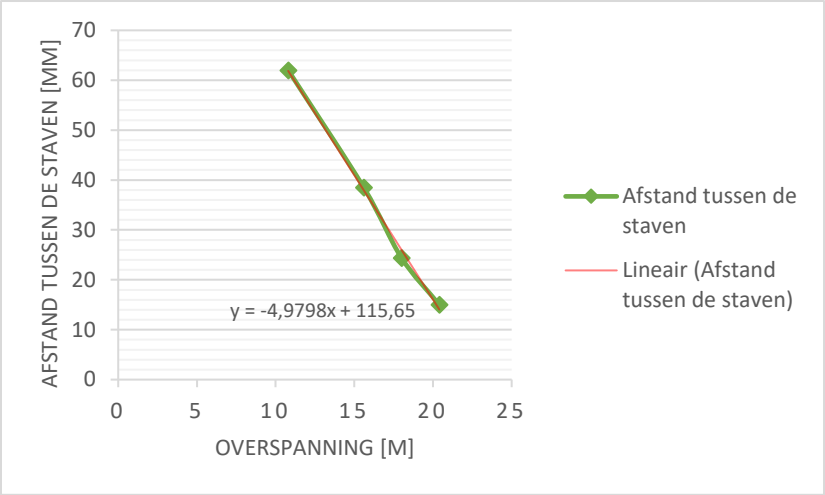
$0{,}0261x + 0{,}0112 = 0{,}45 \quad \Rightarrow \quad x = 16{,}8 \text{ m}$

$-4{,}9798x + 115{,}65 = 36{,}5 \quad \Rightarrow \quad x = 15{,}9 \text{ m}$

Hieruit blijkt dat de afstand tussen de staven een beperkende factor is voor de ontworpen massieve doorsnede. De maximale overspanning die met deze doorsnede bij dit ontwerp gehaald kan worden, is 15,9 meter.



Figuur 8.1 – Scheurwijdte tegen overspanning



Figuur 8.2 – Afstand tussen de staven tegen overspanning

8.1.2 Holle doorsnede

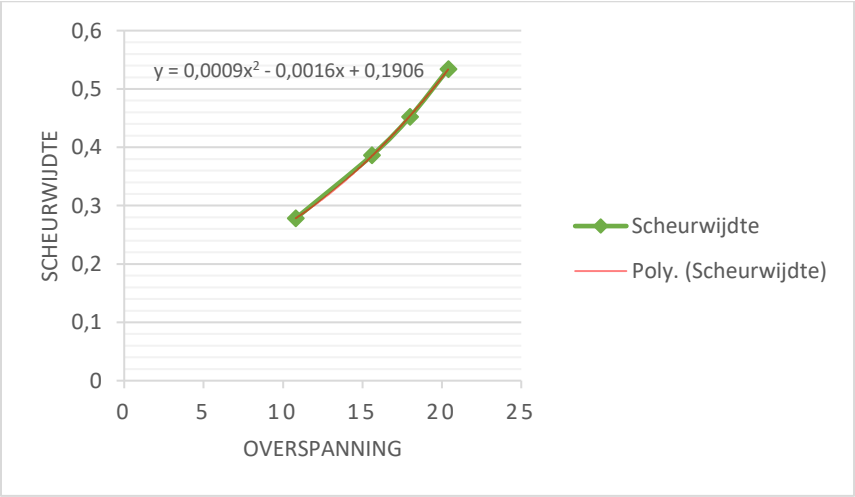
De maatgevende resultaten van vorig hoofdstuk zijn in figuren 8.3 en 8.4 tegen overspanning uitgezet om te kijken of er iets gezegd kan worden over het verloop van deze grafieken.

De punten liggen in die figuren niet meer op een rechte, maar op een gekromde lijn. Het verband tussen de waarden kan nu beter met een polynoom weergegeven worden. De functies van de lijnen zijn met behulp van Excel opgesteld en moeten gelijk gesteld worden aan de maatgevende waarden van vorige paragraaf om de bijbehorende overspanning te krijgen.

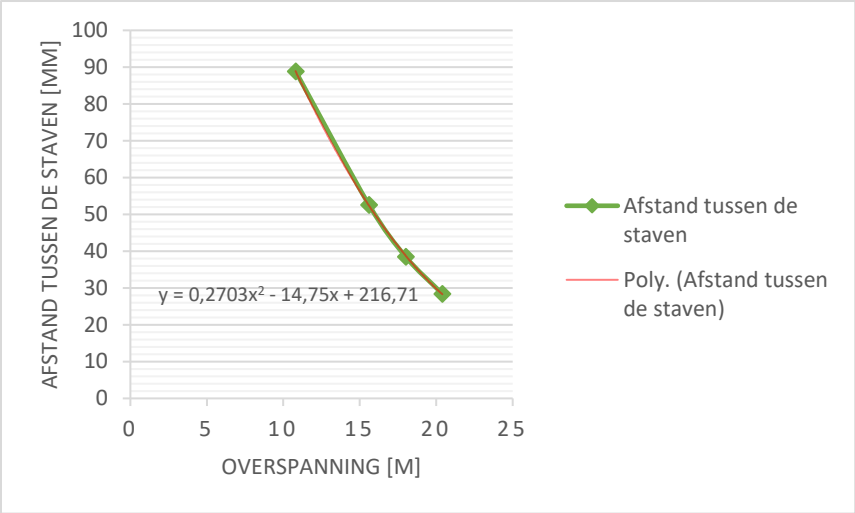
$0{,}0009x^2 - 0{,}0016x + 0{,}1906 = 0{,}45$ ⇨ $x = 17{,}9$ m

$0{,}2703x^2 - 14{,}75x + 216{,}71 = 36{,}5$ ⇨ $x = 18{,}5$ m

Hieruit blijkt dat de scheurwijdte een beperkende factor is voor de ontworpen holle doorsnede. De maximale overspanning die met deze doorsnede bij dit ontwerp gehaald kan worden, is 17,9 meter.



Figuur 8.3 – Scheurwijdte tegen overspanning



Figuur 8.4 – Afstand tussen de staven tegen overspanning

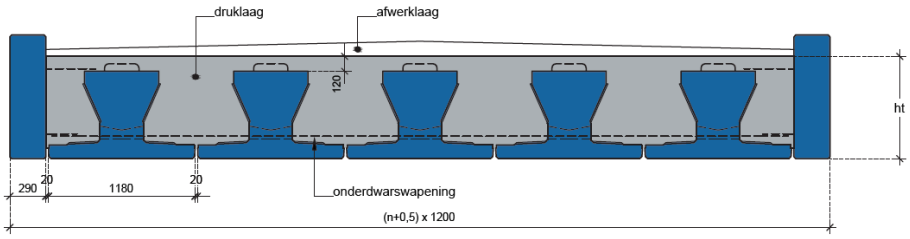
8.2 VOORGESPANNEN PREFAB LIGGERS

Om de invloed van het voorspannen van liggers op de maximale overspanning te onderzoeken, moeten de ontwerpgrafieken van liggers met ongeveer dezelfde doorsnedes als bij traditioneel gewapende liggers gebruikt worden.

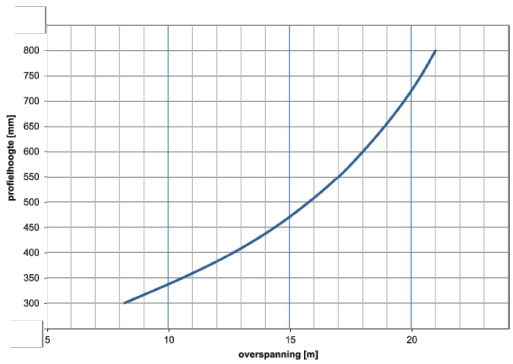
8.2.1 Massieve doorsnede

Voor de vergelijking van deze doorsnede zijn SJP FLEX liggers gekozen. Zie figuur 8.5. Met deze voorgespannen volstortliggers kan namelijk een massief brugdek worden samengesteld. Daarbij wordt, na het plaatsen van de liggers op het werk, een druklaag tussen en op de liggers aangebracht. Figuur 8.6 geeft voor de SJP FLEX liggers aan hun minimale en maximale lengte kan worden afhankelijk van de profielhoogte. Hier is al rekening gehouden met de wegverkeersbelasting en de normen.

De standaard liggerbreedte voor SJP FLEX 300 t/m 800 is 1,18 meter. Wanneer de grootste hoogte gebruikt wordt, kan de overspanning maximaal 21 meter worden. Dat is bijna 5 meter meer dan bij de toepassing van traditioneel gewapende liggers met ongeveer dezelfde breedte gehaald kan worden.



Figuur 8.5 – Dwarsdoorsnede SJP-brug

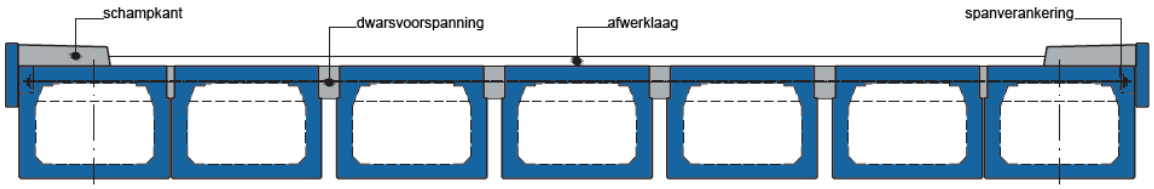


Figuur 8.6 – Draaggrafiek SJP FLEX liggers

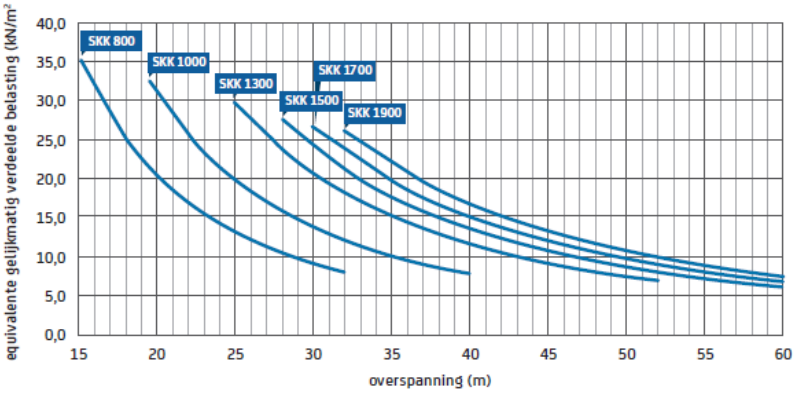
8.2.2 Holle doorsnede

Voor de vergelijking van deze doorsnede zijn SKK kokerliggers gekozen. Zie figuur 8.7. Ook met deze voorgespannen kokerliggers kan een brugdek worden samengesteld. Figuur 8.8 geeft voor deze voorgespannen liggers aan wat de minimale en maximale lengte van de balk kan worden afhankelijk van de profielhoogte en belasting.

De standaard breedte voor SKK 700 t/m 1600 is 1480 mm. Omdat deze liggers wat breder zijn dan de liggers die getoetst zijn, wordt de kleinste hoogte van SKK liggers aangehouden. De minimale en maximale overspanning die bij deze doorsnede horen, zijn respectievelijk 15 en 32 meter.



Figuur 8.7 – Dwarsdoorsnede SKK-brug



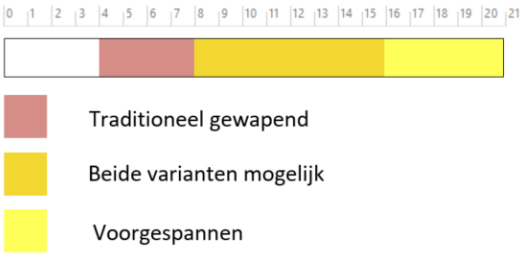
Figuur 8.8 – Ontwerpgrafiek SKK kokerligger

8.3 VERGELIJKING

De gevonden resultaten voor de massieve doorsnede zijn in figuur 8.9 verwerkt. Voor een overspanning tussen 4 en 15,9 meter kunnen de liggers in traditioneel gewapend beton gebruikt worden, terwijl de liggers in voorgespannen beton tussen 8 en 21 meter toegepast kunnen worden.

Voor de holle doorsnede kunnen de gevonden resultaten in figuur 8.10 gevonden worden. Tussen 4 en 17,9 meter kan gebruik worden gemaakt van traditioneel gewapende liggers en tussen 15 en 32 meter van voorgespannen kokerliggers.

Als de overspanning kleiner is dan 4 meter, worden meestal duikers in plaats van bruggen gebruikt. Dat is ook de reden waarom in figuren 8.7 en 8.8 de liggers pas vanaf 4 meter toegepast worden.



Figuur 8.9 – Wapeningsvariant voor een massieve doorsnede per overspanning

Figuur 8.10 – Wapeningsvariant voor een holle doorsnede per overspanning

8.3.1 Keuze op basis van kosten

In het tussenliggende gebied moet de ontwerper zelf een keuze maken basis van beschikbare tijd, budget en ruimte. Aangezien er geen informatie is gegeven over de planning en omstandigheden op de bouwplaats, kunnen alleen de totale kosten vergeleken worden. Dit wordt alleen voor de massieve liggers gedaan, omdat de kokerliggers niet in het werk gestort worden.

Voor het bepalen van de kosten per vierkante meter is het rekensysteem van SWECO gebruikt. Om dat systeem te kunnen gebruiken, zijn verschillende aannames gedaan. Voor de dikte van de dekvloer is weer 1/20 van de overspanning aangenomen en is de hoeveelheid wapeningsstaal met behulp van interpolatie vastgesteld.

De totale prijzen zijn voor de overspanningen van 8, 12 en 16 meter bepaald en in figuur 8.11 weergegeven. Om erachter te komen welke uitvoer van de viaductplaat goedkoper is, zijn de totale kosten tegen overspanning uitgezet in figuur 8.12. Hieruit blijkt dat de in het werk gestorte liggers goedkoper zijn tot een overspanning van ongeveer 8,5 meter en dat voor een grotere overspanning de SJP liggers goedkoper zijn.

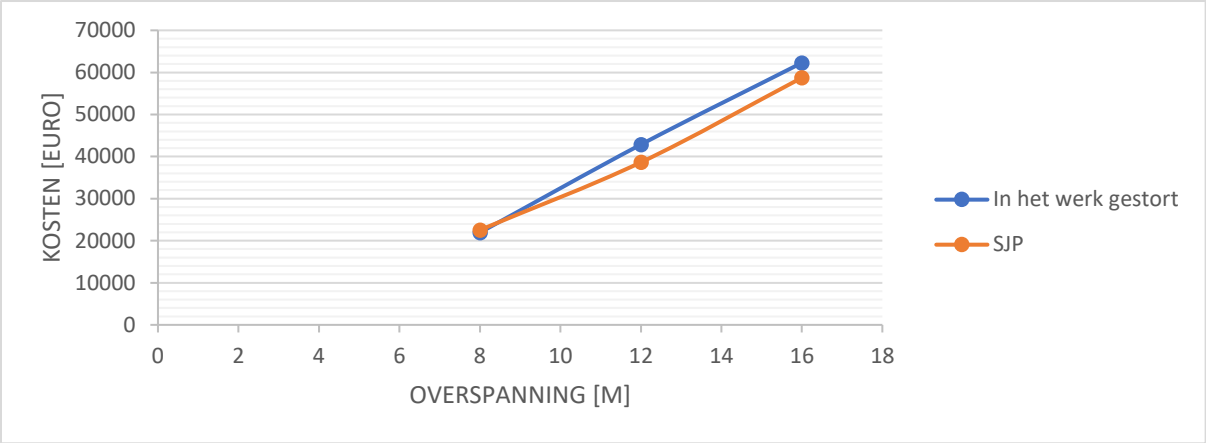
SWECO

GWC110901 — Sweco Nederland B.V. — Bladnr. 1 van 1

Project omschrijving : In het werk gestort brugdek en volstortliggers SJP — 17-10-2018
Datum : 17-10-2018 — 12:10:07
Prijspeil : 01-01-2018

1	VOORBEREIDENDE WERKEN					
1010	In het werk gestort					
101010	Brugdek, d=400mm	80,00	m2	N	274,10	21.928,12
	Dekvloer (excl randkist) dik 400 incl. onderst. C30/37; 110 kg/m3 B500B	80,00	m2		261,93	20.954,68
	Randkist voor rechte dekvloer d=400 mm	36,00	m		27,04	973,44
101020	Brugdek, d=600mm	120,00	m2	N	357,13	42.856,12
	Randkist voor rechte dekvloer d=600 mm	44,00	m		40,56	1.784,64
	Dekvloer (excl randkist) dik 600 incl. onderst. C30/37; 115 kg/m3 B500B	120,00	m2		342,26	41.071,48
101030	Brugdek, d=800mm	160,00	m2	N	389,24	62.278,47
	Randkist voor rechte dekvloer d=800 mm	52,00	m		54,08	2.812,16
	Dekvloer (excl randkist) dik 800 incl. onderst. C30/37; 115 kg/m3 B500B	160,00	m2		371,66	59.466,31
1020	SJP					
102010	SJP-300, druklaag 80mm	80,00	m2	N	281,83	22.546,16
	Aanbrengen brugdek van SJP300 incl drukdek 80mm C30/37 met 150 kg/m3	80,00	m2		281,83	22.546,16
102020	SJP-400, druklaag 90mm	120,00	m2	N	321,96	38.635,71
	Aanbrengen brugdek van SJP400 incl drukdek 90mm C30/37 met 150 kg/m3	120,00	m2		321,96	38.635,71
102030	SJP-500, druklaag 100mm	160,00	m2	N	367,10	58.736,23
	Aanbrengen brugdek van SJP500 incl drukdek 100mm C30/37 met 150 kg/m3	160,00	m2		367,10	58.736,23
	Subtotaal					246.980,80

Figuur 8.11 – Prijsoverzicht



Figuur 8.12 – Kosten van in het werk gestorte en SJP liggers in het tussenliggende gebied

9 CONCLUSIE

Het doel van dit rapport was om de lezers in staat te stellen om een optimale keuze te maken tussen de twee wapeningsvarianten bij een gegeven overspanning van een viaduct. Hiervoor zijn de traditioneel gewapende liggers bij verschillende overspanningen op sterkte, scheurwijdte en doorbuiging getoetst waarbij rekening is gehouden met twee soorten doorsnedes, namelijk massief en hol. Uit de berekeningen is gebleken dat de scheurbeheersing maatgevend is.

Voor de liggers met een massieve doorsnede bleek de afstand tussen de wapeningsstaven de beperkende factor te zijn. De maximale overspanning die met deze liggers gehaald kan worden, is vergeleken met de ontwerpgrafiek van voorgespannen SJP liggers.

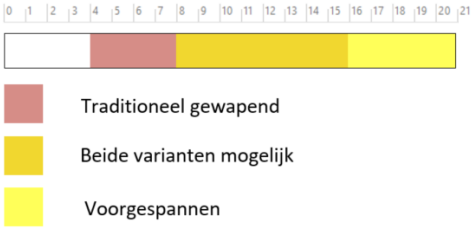
- Traditioneel gewapend: 4 – 15,9 meter
- Voorgespannen: 8 – 21 meter

Voor de liggers met een holle doorsnede bleek de scheurwijdte de beperkende factor te zijn. De maximale overspanning die met deze liggers gehaald kan worden, is vergeleken met de ontwerpgrafiek van voorgespannen SKK liggers.

- Traditioneel gewapend: 4 – 17,9 meter
- Voorgespannen: 15 – 32 meter

De toename van de maximale overspanning kan verklaard worden door het feit dat het eigen gewicht van de constructie is afgenomen, terwijl de momentcapaciteit niet veranderd is. De hoogte van de betondrukzone is voor elke overspanning namelijk kleiner dan de dikte van de doorsnede. Voor dezelfde overspanning mag het aantal wapeningsstaven in de holle doorsnede dus verminderd worden. Dit heeft als gevolg dat de afstand tussen de staven groter kan worden waardoor het materiaal weer beter benut kan worden.

Figuren 9.1 en 9.2 zijn een overzichtelijke weergave van de gevonden resultaten.

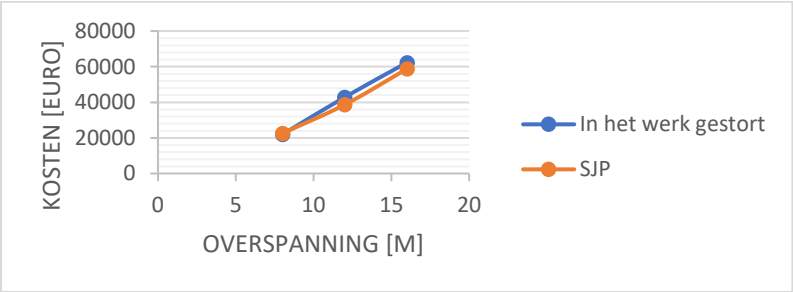


Figuur 9.1 – Wapeningsvariant voor een massieve doorsnede per overspanning

Figuur 9.2 – Wapeningsvariant voor een holle doorsnede per overspanning

Zoals in de figuren te zien is, kunnen voor bepaalde overspanningen beide wapeningsvarianten gebruikt worden. Om de keuze in dat tussenliggende gebied eenvoudiger te maken, is voor de traditioneel gewapende liggers ook naar de kosten gekeken. De totale kosten van de viaductplaat zijn tegen overspanning uitgezet in figuur 9.3.

- Overspanning tot 8,5 meter: in het werk gestorte liggers goedkoper
- Overspanning vanaf 8,5 meter: SJP liggers goedkoper



Figuur 9.3 – Kosten van in het werk gestorte en SJP liggers in het tussenliggende gebied

BEPERKINGEN

Dit deel van het verslag geeft informatie over de beperkingen van de uiteindelijke resultaten. De grootste beperking is de schematisering van de viaductplaat als een balkrooster. Door de constructie als een balkrooster te modelleren, wordt het spanningsverloop veranderd. De belastingen zouden normaal gesproken in alle richtingen afgedragen kunnen worden, terwijl in dit geval dat niet zo is.

Een ander aandachtspunt is het feit dat de wringing en vermoeiing niet meegenomen zijn bij de berekeningen. Als de UGT toets volledig uitgevoerd zou worden, zou dit gevolgen kunnen hebben voor de maximale overspanning.

Als laatst zijn bij veel onderdelen aannames gedaan. De grafieken van hoofdstuk 9 kunnen alleen gebruikt worden als dezelfde uitgangspunten worden gebruikt in het ontwerp. Er moet dan bijvoorbeeld gewerkt worden met een constante verhouding tussen de balkhoogte en overspanning en een rij wapeningsstaven. De waarden van de betondekking en diameters van wapeningsstaven en beugels liggen ook vast. De overgang van traditioneel gewapende naar voorgespannen liggers geldt dan ook alleen voor die aangenomen waarden.

AANBEVELINGEN

Een interessante vervolgstap naar aanleiding van dit verslag zou kunnen zijn om wringing en vermoeiing mee te nemen bij de berekeningen. Op deze manier worden de berekeningen volledig en kunnen de resultaten voor echte constructies gebruikt worden. Eventueel zou ook nog gekeken kunnen worden naar andere soorten doorsnedes.

Een andere vervolgopdracht zou kunnen zijn om een plaat in SCIA te modelleren en die vervolgens te vergelijken met het balkrooster. Na deze vergelijking zou iets gezegd kunnen worden over de juistheid en precisie van de resultaten.

BIBLIOGRAFIE

[1] C. Wang, Reinforced Concrete Design, 2017.

[2] J. Brakel, Balkroosterbruggen en Orthotrope plaatbruggen, T.H. Delft, 1973.

Eurocode: Grondslagen van het constructiefontwerp, (p.46), 2011.

Nationale bijlage bij NEN-EN 1990+A1+A1/C2: Eurocode: Grondslagen van het constructief ontwerp.

Eurocode 1: Belastingen op constructies - Deel 2: Verkeersbelasting op bruggen (p.40), 2011.

Nationale bijlage bij NEN-EN 1991-2+C1: Eurocode 1: Belastingen op constructies –Deel 2: Verkeersbelasting op bruggen

Eurocode 2: Ontwerp en berekening van betonconstructies - Deel 1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen (p.30), 2011.

Nationale bijlage bij NEN-EN 1992-1-1+C2: Eurocode 2: Ontwerp en berekening van betonconstructies - Deel 1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen

FIGUREN- EN TABELLENLIJST

Voorpagina:	*Overgenomen uit Pixabay door Hans Braxmeier.*
Figuur 1.1:	*Overgenomen uit Management of engineering Projects – People are Key door Hans Bakker.*
Figuur 2.1:	*Overgenomen uit Constructieleer Gewapend Beton door dr.ir.drs. C.R. Braam en ir. P. Lagendijk, 2011, Uitgeverij Aeneas bv.*
Figuur 2.2:	*Overgenomen uit Constructieleer Gewapend Beton door dr.ir.drs. C.R. Braam en ir. P. Lagendijk, 2011, Uitgeverij Aeneas bv.*
Figuur 2.3:	*Overgenomen uit Folder HKP-ligger door Haitsma*
Figuur 2.4:	*Overgenomen uit Folder HKP-ligger door Haitsma*
Figuur 3.1:	*Overgenomen uit Nieuwe Ontwerprichtlijn Autosnelwegen door Rijkswaterstaat, (p.4-5), 2007, Uitgeverij Ria Dubbeldam bv.*
Figuur 3.2:	*Overgenomen uit Eurocode 1: Belastingen op constructies - Deel 2: Verkeersbelasting op bruggen (p.36), 2011.*
Figuur 3.3:	*Overgenomen uit Eurocode 1: Belastingen op constructies - Deel 2: Verkeersbelasting op bruggen (p.40), 2011.*
Figuur 3.4:	*Aangepast overgenomen uit Eurocode 1: Belastingen op constructies - Deel 2: Verkeersbelasting op bruggen (p.40), 2011.*
Figuur 3.5:	*Overgenomen uit Eurocode: Grondslagen van het constructiefontwerp, (p.46), 2011.*
Figuur 4.1:	*Aangepast overgenomen uit Balkroosterbruggen en Orthotrope plaatbruggen door ir. J. Brakel, 1973.*
Figuur 4.2:	-
Figuur 4.3:	-
Figuur 7.1:	-
Figuur 8.1:	-
Figuur 8.2:	-
Figuur 8.3:	-
Figuur 8.4:	-
Figuur 8.5:	*Overgenomen uit Volstortliggers – SJP FLEX door Spanbeton, (p.1).*
Figuur 8.6:	*Overgenomen uit Volstortliggers – SJP FLEX door Spanbeton, (p.5).*
Figuur 8.7:	*Overgenomen uit Kokerbalkconstructies – SKK door Spanbeton, (p.1).*
Figuur 8.8:	*Overgenomen uit Kokerbalkconstructies – SKK door Spanbeton, (p.5).*
Figuur 8.9:	-
Figuur 8.10:	-
Figuur 8.11:	-
Figuur 8.12:	-

Figuur 9.1: -

Figuur 9.2: -

Figuur 9.3: -

Tabel 3.1: *Overgenomen uit Nieuwe Ontwerprichtlijn Autosnelwegen door Rijkswaterstaat, (p.4-7), 2007, Uitgeverij Ria Dubbeldam bv.*

Tabel 3.2: *Overgenomen uit Eurocode 1: Belastingen op constructies - Deel 2: Verkeersbelasting op bruggen (p.35), 2011.*

Tabel 3.3: *Overgenomen uit Eurocode 1: Belastingen op constructies - Deel 2: Verkeersbelasting op bruggen (p.39), 2011.*

Tabel 3.4: *Overgenomen uit Nationale bijlage bij Eurocode: Grondslagen van het constructief ontwerp, (p.25), 2011.*

Tabel 3.5: *Overgenomen uit Nationale bijlage bij Eurocode: Grondslagen van het constructief ontwerp, (p.21), 2011.*

Tabel 4.1: -

Tabel 5.1: *Overgenomen uit Eurocode 2: Ontwerp en berekening van betonconstructies - Deel 1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen (p.5), 2011.*

Tabel 5.2: *Overgenomen uit Eurocode 2: Ontwerp en berekening van betonconstructies - Deel 1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen (p.30), 2011.*

Tabel 5.3: *Overgenomen uit QUICK REFERENCE door prof. Ir. L.A.G. Wagemans, (p.cb3), 2014.*

Tabel 5.4: *Overgenomen uit Eurocode 2: Ontwerp en berekening van betonconstructies - Deel 1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen (p.50), 2011.*

Tabel 5.5: *Overgenomen uit Eurocode 2: Ontwerp en berekening van betonconstructies - Deel 1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen (p.54), 2011.*

Tabel 5.6: *Overgenomen uit GTB 2013 Grafieken en Tabellen voor Beton gebaseerd op de Europese Normen voor Ontwerp, Materiaal en Uitvoering (p.6).*

Tabel 5.7: *GTB 2013 Grafieken en Tabellen voor Beton gebaseerd op de Europese Normen voor Ontwerp, Materiaal en Uitvoering (p.74).*

Tabel 5.8: *GTB 2013 Grafieken en Tabellen voor Beton gebaseerd op de Europese Normen voor Ontwerp, Materiaal en Uitvoering (p.104).*

Tabel 5.9: *GTB 2013 Grafieken en Tabellen voor Beton gebaseerd op de Europese Normen voor Ontwerp, Materiaal*
en Uitvoering (p.94).

Tabel 6.1: *Overgenomen uit Eurocode 2: Ontwerp en berekening van betonconstructies – Deel 1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen, (p.128), 2011.*

Tabel 6.2: *Overgenomen uit Tabellen en grafieken – Basiskennis beton, (p.17), 2016.*

Tabel 6.3: *Overgenomen uit QUICK REFERENCE door prof. Ir. L.A.G. Wagemans, (p.gl14), 2014.*

Tabel 7.1: -

BIJLAGE 1

ontwerp-snelheid	ontwerp-voertuig	functie strook	functie linker strook	functie rechter strook	breedte
120 km/h	personenauto	rijden	rijden	rijden	3,35
				vluchten/redresseren	3,25
			vluchten/redresseren	rijden	3,25
				vluchten/redresseren	3,30
		vluchten	rijden	geen strook	3,15
			geen strook	rijden	n.v.t.
		redresseren	rijden	geen strook	0,60
			geen strook	rijden	0,60
	vrachtauto	rijden	rijden	rijden	3,35
				vluchten/redresseren	3,30
			vluchten/redresseren	rijden	3,30
				vluchten/redresseren	3,35
		vluchten	rijden	geen strook	3,15
			geen strook	rijden	n.v.t.
		redresseren	rijden	geen strook	0,60
			geen strook	rijden	0,60
100 km/h	personenauto	rijden	rijden	rijden	3,10
				vluchten/redresseren	3,05
			vluchten/redresseren	rijden	3,05
				vluchten/redresseren	3,10
		vluchten	rijden	geen strook	3,15
			geen strook	rijden	n.v.t.
		redresseren	rijden	geen strook	0,60
			geen strook	rijden	0,60
	vrachtauto	rijden	rijden	rijden	3,35
				vluchten/redresseren	3,30
			vluchten/redresseren	rijden	3,30
				vluchten/redresseren	3,35
		vluchten	rijden	geen strook	3,15
			geen strook	rijden	n.v.t.
		redresseren	rijden	geen strook	0,60
			geen strook	rijden	0,60
80 km/h	personenauto	rijden	rijden	rijden	2,80
				vluchten/redresseren	2,75
			vluchten/redresseren	rijden	2,75
				vluchten/redresseren	2,80
		vluchten	rijden	geen strook	3,15
			geen strook	rijden	n.v.t.
		redresseren	rijden	geen strook	0,30
			geen strook	rijden	0,30
	vrachtauto	rijden	rijden	rijden	3,35
				vluchten/redresseren	3,30
			vluchten/redresseren	rijden	3,30
				vluchten/redresseren	3,20
		vluchten	rijden	geen strook	3,15
			geen strook	rijden	n.v.t.
		redresseren	rijden	geen strook	0,30
			geen strook	rijden	0,30

Tabel 3.1 - Strookbreedtes voor gestrekte wegvakken (hoofdrijbanen en parallelrijbanen)

Gevolgklasse	β	G			Verkeer (met ψ = 1)	Overig veranderlijk (met ψ = 1)
		$\gamma_{G,j,sup}$		$\gamma_{G,j,inf}$		
		6.10a	6.10b (incl. ξ)	6.10a en 6.10b		
CC1	3,3	1,20	1,10	0,9	1,20	1,35
CC2	3,8	1,30	1,20	0,9	1,35	1,5
CC3	4,3	1,40	1,25	0,9	1,5	1,65

γ = 0 voor gunstig werkende veranderlijke belastingen

Voor γ_F zie de aanbevelingen in de desbetreffende materiaalgebonden Eurocodes 1992 t.m. 1999.

Voor de berekening van het effect van ongelijkmatige zettingen geldt dat $\gamma_{G,set}$ = 1,20 in het geval van een lineaire berekening en $\gamma_{G,set}$ = 1,35 in het geval van een niet lineaire berekening. Gunstig werkende zettingsverschillen worden niet in rekening gebracht. De grootte van de zettingen is bepaald op basis van de karakteristieke belastingscombinatie en de karakteristieke waarden voor de grondeigenschappen.

OPMERKING De factor K_{Fi} volgens B 3.3 is in de waarden van γ verwerkt; voor de zettingsberekening blijft de betrouwbaarheidsdifferentiatie achterwege.

Tabel 3.4 – Belastingsfactoren voor wegverkeersbruggen en bruggen voor langzaam verkeer en voetgangers- en fietsbruggen STR/GEO (groep B)

Belasting	Symbool		ψ_0	ψ_1	ψ_2
Verkeersbelastingen (zie NEN-EN 1991-2+C1, tabel 4.4)	gr1a (LM1 + voetgangers- of fietspad-belastingen)	TS	0,8	0,8	0,4
		UDL		0,8	
		Horizontale belasting		0,8	
		voetgangers- + fietspad-belastingen		0,8 [d]	
	gr1b (enkele as)		0	0,8 [b]	0
	gr2 (horizontale krachten dominant)		0,8	0,8 [c]	0
	gr3 (voetgangersbelastingen)		0	0,8 [b]	0
	gr4 (LM4 – belasting door een menigte)		0	0,8 [b]	0
	gr5 (LM3 – speciale voertuigen)	TS	0	0,8 [b]	0
		UDL		0,8 [b]	
		Horizontale belastingen		0,8 [b]	
		Speciaal voertuig		1,0 [b]	
Windkrachten	F_{Wk}	blijvende ontwerpsituatie	0,3	0,6 [b]	0
		uitvoering	0,8	0	0
	F_W^*		1,0	0	–
Thermische belastingen	T_k		0,3	0,8 [b]	0,3 [a]
Sneeuwbelastingen	$Q_{Sn,k}$	blijvende ontwerpsituatie	0	0	0
		uitvoering	0,6	0	0
Belastingen tijdens de bouw	Q_c		1,0	0	1,0

[a] In de uiterste grenstoestand mag voor ψ_2 voor thermische belasting de waarde 0 zijn aangehouden.

[b] Voor aanrijding op of onder de brug en aanvaring is ψ_1 = 0.

[c] Voor scheurvomingsberekeningen van beton zijn de verschillende waarden van ψ_1 gelijk aan de waarden behorend bij gr1a.

[d] Voor scheurvormingsberekeningen van beton moet ψ_1 = 0 ,4 zijn aangehouden.

OPMERKING Groepen verkeersbelastingen hoeven niet met elkaar te zijn gecombineerd.

Tabel 3.5 – ψ–factoren voor bruggen voor weg- en langzaam verkeer

BIJLAGE 2

Ontwerpsituaties	γ_C voor beton	γ_S voor betonstaal	γ_S voor voorspanstaal
Blijvend en tijdelijk	1,5	1,15	1,1
Buitengewoon	1,2	1,0	1,0

Tabel 5.1 – Partiële factoren voor materialen voor uiterste grenstoestanden

Sterkteklassen voor beton															Vergelijking/Verklaring
f_{ck} (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	
$f_{ck,cube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105	
f_{cm} (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	$f_{cm} = f_{ck}+8$(MPa)
f_{ctm} (MPa)	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	$f_{ctm}=0{,}30\times f_{ck}^{(2/3)} \leq$C50/60 $f_{ctm}=2{,}12\cdot\ln(1+(f_{cm}/10))$ > C50/60
$f_{ctk,0,05}$ (MPa)	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5	$f_{ctk;0,05} = 0{,}7\times f_{ctm}$ 5 % fractiel
$f_{ctk,0,95}$ (MPa)	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6	$f_{ctk;0,95} = 1{,}3\times f_{ctm}$ 95 % fractiel
E_{cm} (GPa)	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44	$E_{cm} = 22[(f_{cm})/10]^{0,3}$ (f_{cm} in MPa)
ε_{c1} (‰)	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8	zie figuur 3.2 ε_{c1} ($^0/_{00}$) = 0,7 $f_{cm}^{0,31} \leq 2{,}8$
ε_{cu1} (‰)	3,5									3,2	3,0	2,8	2,8	2,8	zie figuur 3.2 voor $f_{ck} \geq 50$ MPa $\varepsilon_{cu1}(^0/_{00})=2{,}8+27[(98-f_{cm})/100]^4$
ε_{c2} (‰)	2,0									2,2	2,3	2,4	2, 5	2,6	zie figuur 3.3 voor $f_{ck} \geq 50$ MPa $\varepsilon_{c2}(^0/_{00})=2{,}0+0{,}085(f_{ck}-50)^{0,53}$
ε_{cu2} (‰)	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6	zie figuur 3.3 voor $f_{ck} \geq 50$ MPa $\varepsilon_{cu2}(^0/_{00})=2{,}6+35[(90-f_{ck})/100]^4$
n	2,0									1,75	1,6	1,45	1,4	1,4	voor $f_{ck} \geq 50$ MPa $n=1{,}4+23{,}4[(90-f_{ck})/100]^4$
ε_{c3} (‰)	1,75									1,8	1,9	2,0	2,2	2,3	zie figuur 3.4 voor $f_{ck} \geq 50$ MPa $\varepsilon_{c3}(^0/_{00})=1{,}75+0{,}55[(f_{ck}-50)/40]$
ε_{cu3} (‰)	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6	zie figuur 3.4 voor $f_{ck} \geq 50$ MPa $\varepsilon_{cu3}(^0/_{00})=2{,}6+35[(90-f_{ck})/100]^4$

Tabel 5.2 – Sterkte- en vervormingseigenschappen voor beton

strength and stiffness

material property (bars)			steel grade FeB 400 HWL, HK	FeB 500 HWL, HK	FeB 500 HKN
tensile strength	$f_{t;k}$	[N/mm²]	400	500	500
yield stress	$f_{y;k}$	[N/mm²]	350	435	435
strain of reinforcement at maximum load	ε_{su}	$^0/_{00}$	4,00	3,25	2,75

material property (nets)			reinforcement nets FeB 500 HKN, HWN
tensile strength	$f_{t;k}$	[N/mm²]	500
design value tensile strength	$f_{y;k}$	[N/mm²]	435
strain of reinforcement at maximum load	ε_{su}	$^0/_{00}$	2,175

Tabel 5.3 – Gegevens over wapeningsstaal

Klasse-aanduiding	Beschrijving van het milieu	Informatieve voorbeelden waar de milieuklassen zich kunnen voordoen
1 Geen risico op corrosie of aantasting		
X0	Voor beton zonder wapening of ingestorte metalen: alle milieus, behalve bij vorst/dooi, afslijting of chemische aantasting. Voor beton met wapening of ingesloten metalen: zeer droog	Beton binnen gebouwen met zeer lage luchtvochtigheid
2 Corrosie ingeleid door carbonatatie		
XC1	Droog of blijvend nat	Beton binnen gebouwen met lage luchtvochtigheid Beton blijvend onder water
XC2	Nat, zelden droog	Betonoppervlakken langdurig in contact met water Veel funderingen
XC3	Matige vochtigheid	Beton binnen gebouwen met matige of hoge luchtvochtigheid Beton buiten beschut tegen regen
XC4	Wisselend nat en droog	Betonoppervlakken in contact met water, maar die niet onder milieuklasse XC2 vallen
3 Corrosie ingeleid door chloriden *		
XD1	Matige vochtigheid	Betonoppervlakken blootgesteld aan chloriden uit de lucht
XD2	Nat, zelden droog	Zwembaden Beton blootgesteld aan chloridehoudend industriewater
XD3	Wisselend nat en droog	Brugdelen blootgesteld aan chloridehoudend spatwater Verhardingen Vloeren van parkeerplaatsen voor voertuigen
4 Corrosie ingeleid door chloriden afkomstig uit zeewater		
XS1	Blootgesteld aan zout uit de lucht, maar niet in direct contact met zeewater	Constructies bij of aan de kust
XS2	Blijvend onder zeewater	Delen van constructies in zee
XS3	Getijde-, spat- en stuifzones	Delen van constructies in zee
5 Aantasting door vorst/dooi-wisselingen		
XF1	Niet volledig verzadigd met water, zonder dooizouten	Verticale betonoppervlakken blootgesteld aan regen en vorst
XF2	Niet volledig verzadigd met water, met dooizouten	Verticale betonoppervlakken van wegconstructies blootgesteld aan vorst en met de lucht meegevoerde dooizouten
XF3	Verzadigd met water, zonder dooizouten	Horizontale betonoppervlakken blootgesteld aan regen en vorst
XF4	Verzadigd met water, met dooizouten of zeewater	Wegen en brugdekken blootgesteld aan dooizouten Betonoppervlakken blootgesteld aan direct gesproeide dooizouten en vorst Spatzones van constructies in zee blootgesteld aan vorst
6 Chemische aantasting		
XA1	Zwak agressief chemisch milieu volgens tabel 2 van EN 206-1	Natuurlijke grond en grondwater
XA2	Matig agressief milieu volgens tabel 2 van EN 206-1	Natuurlijke grond en grondwater
XA3	Sterk agressief milieu volgens tabel 2 van EN 206-1	Natuurlijke grond en grondwater

Tabel 5.4 – Verband tussen milieuklassen en milieuomstandigheden volgens EN 206-1

Omgevingseisen voor $c_{min,dur}$ (mm)							
Constructie-klasse	Milieuklasse volgens tabel 4.1						
	X0	XC1	XC2 / XC3	XC4	XD1 / XS1	XD2 / XS2	XD3 / XS3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

Tabel 5.5 – Waarden van de minimale dekkingseisen $c_{min,dur}$

Gezamenlijke doorsnede van betonstaalstaven in mm²

∅	massa per staaf (kg/m)	aantal staven									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6	0,222	28	57	85	113	141	170	198	226	254	283
8	0,395	50	101	151	201	251	302	352	402	453	503
10	0,617	79	157	236	314	393	471	550	628	707	785
12	0,888	113	226	339	452	565	679	792	905	1018	1131
14	1,208	154	308	462	615	769	923	1077	1231	1385	1539
16	1,578	201	402	603	804	1005	1206	1407	1608	1810	2011
20	2,466	314	628	942	1257	1571	1885	2199	2513	2827	3142
25	3,853	491	982	1473	1963	2454	2945	3436	3927	4418	4909
32	6,313	804	1608	2413	3217	4021	4825	5630	6434	7238	8042
40	9,865	1257	2513	3770	5027	6283	7540	8796	10053	11310	12566
50	15,406	1962	3925	5887	7850	9812	11775	13737	15700	17662	19625

Tabel 5.6 – Gezamenlijke doorsnede van betonstaalstaven in mm²

GTB 2010 - 11.2

buiging zonder normaalkracht
bij rechthoekige doorsneden

- **alle sterkteklassen t.m. C50/60**
- **FeB 220 - FeB 400 - (Fe)B 500**

$\frac{M_{Ed}}{f_{cd}\, b\, d^2}$	$100\, k\, \rho_l$	k_x	k_z
50	5,137	0,068	0,973
52	5,348	0,071	0,972
54	5,560	0,074	0,971
56	5,773	0,077	0,970
58	5,986	0,080	0,969
60	6,199	0,083	0,968
62	6,413	0,086	0,967
64	6,628	0,088	0,966
66	6,843	0,091	0,965
68	7,058	0,094	0,963
70	7,274	0,097	0,962
72	7,491	0,100	0,961
74	7,708	0,103	0,960
76	7,926	0,106	0,959
78	8,144	0,109	0,958
80	8,363	0,112	0,957
82	8,582	0,114	0,956
84	8,802	0,117	0,954
86	9,022	0,120	0,953
88	9,243	0,123	0,952
90	9,464	0,126	0,951
92	9,687	0,129	0,950
94	9,909	0,132	0,949
96	10,132	0,135	0,947
98	10,356	0,138	0,946
100	10,580	0,141	0,945
102	10,805	0,144	0,944
104	11,031	0,147	0,943
106	11,257	0,150	0,942
108	11,484	0,153	0,940
110	11,711	0,156	0,939
112	11,939	0,159	0,938
114	12,168	0,162	0,937
116	12,397	0,165	0,936
118	12,627	0,168	0,935
120	12,857	0,171	0,933
122	13,088	0,175	0,932
124	13,320	0,178	0,931
126	13,552	0,181	0,930
128	13,785	0,184	0,929
130	14,019	0,187	0,927
132	14,253	0,190	0,926
134	14,488	0,193	0,925
136	14,724	0,196	0,924
138	14,961	0,199	0,922
140	15,198	0,203	0,921
142	15,435	0,206	0,920
144	15,674	0,209	0,919
146	15,913	0,212	0,917
148	16,153	0,215	0,916

$\frac{M_{Ed}}{f_{cd}\, b\, d^2}$	$100\, k\, \rho_l$	k_x	k_z
150	16,394	0,219	0,915
152	16,635	0,222	0,914
154	16,877	0,225	0,912
156	17,120	0,228	0,911
158	17,363	0,232	0,910
160	17,608	0,235	0,909
162	17,853	0,238	0,907
164	18,098	0,241	0,906
166	18,345	0,245	0,905
168	18,592	0,248	0,904
170	18,841	0,251	0,902
172	19,090	0,255	0,901
174	19,339	0,258	0,900
176	19,590	0,261	0,898
178	19,841	0,265	0,897
180	20,094	0,268	0,896
182	20,347	0,271	0,894
184	20,600	0,275	0,893
186	20,855	0,278	0,892
188	21,111	0,281	0,891
190	21,367	0,285	0,889
192	21,625	0,288	0,888
194	21,883	0,292	0,887
196	22,142	0,295	0,885
198	22,402	0,299	0,884
200	22,663	0,302	0,882
202	22,925	0,306	0,881
204	23,188	0,309	0,880
206	23,452	0,313	0,878
208	23,717	0,316	0,877
210	23,982	0,320	0,876
212	24,249	0,323	0,874
214	24,517	0,327	0,873
216	24,785	0,330	0,871
218	25,055	0,334	0,870
220	25,326	0,338	0,869
222	25,597	0,341	0,867
224	25,870	0,345	0,866
226	26,144	0,349	0,864
228	26,419	0,352	0,863
230	26,695	0,356	0,862
232	26,972	0,360	0,860
234	27,250	0,363	0,859
236	27,530	0,367	0,857
238	27,810	0,371	0,856
240	28,092	0,375	0,854
242	28,375	0,378	0,853
244	28,659	0,382	0,851
246	28,944	0,386	0,850
248	29,230	0,390	0,848

$\frac{M_{Ed}}{f_{cd}\, b\, d^2}$	$100\, k\, \rho_l$	k_x	k_z
250	29,518	0,394	0,847
252	29,807	0,397	0,845
254	30,097	0,401	0,844
256	30,388	0,405	0,842
258	30,681	0,409	0,841
260	30,975	0,413	0,839
262	31,270	0,417	0,838
264	31,567	0,421	0,836
266	31,865	0,425	0,835
268	32,164	0,429	0,833
270	32,465	0,433	0,832
272	32,767	0,437	0,830
274	33,071	0,441	0,829
276	33,376	0,445	0,827
278	33,683	0,449	0,825
280	33,991	0,453	0,824
282	34,300	0,457	0,822
284	34,612	0,461	0,821
286	34,924	0,466	0,819
288	35,239	0,470	0,817
290	35,555	0,474	0,816
292	35,872	0,478	0,814
294	36,192	0,483	0,812
296	36,513	0,487	0,811
298	36,836	0,491	0,809
300	37,160	0,495	0,807
302	37,486	0,500	0,806
304	37,814	0,504	0,804
306	38,144	0,509	0,802
308	38,476	0,513	0,800
310	38,810	0,517	0,799
312	39,146	0,522	0,797
314	39,483	0,526	0,795
316	39,823	0,531	0,794
318	40,165	0,536	0,792
320	40,509	0,540	0,790
322	40,855	0,545	0,788
324	41,203	0,549	0,786
326	41,553	0,554	0,785
328	41,906	0,559	0,783
330	42,260	0,563	0,781
332	42,618	0,568	0,779
334	42,977	0,573	0,777
336	43,339	0,578	0,775
338	43,704	0,583	0,773
340	44,071	0,588	0,771
342	44,441	0,593	0,770
344	44,813	0,598	0,768
346	45,188	0,603	0,766
348	45,566	0,608	0,764
350	45,946	0,613	0,762
352	46,330	0,618	0,760

M_{Ed} in kNm — f_{cd} in N/mm² — $A_s = \rho_l\, b\, d\, 10^6$ — $x = k_x\, d$
b en d in m — A_s in mm² — $z = k_z\, d$

k-waarden voor de berekening van ρ_l									
$k = f_{yd}/f_{cd}$	C16/20 $f_{cd} = 10,7$	C20/25 $f_{cd} = 13,3$	C25/30 $f_{cd} = 16,7$	C28/35 $f_{cd} = 18,7$	C30/37 20,0	C35/45 $f_{cd} = 23,3$	C40/50 $f_{cd} = 26,7$	C45/55 $f_{cd} = 30,0$	C50/60 $f_{cd} = 33,3$
FeB 220	17,9	14,3	11,5	10,2	9,6	8,2	7,2	6,4	5,7
FeB 400	32,6	26,1	20,9	18,6	17,4	14,9	13,0	11,6	10,4
(Fe)B500	40,8	32,6	26,1	23,3	21,7	18,6	16,3	14,5	13,0

Tabel 5.7 – Ontwerptabel voor buiging zonder normaalkracht bij rechthoekige doorsnede

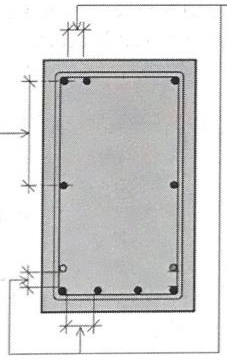
minimum ø in mm [1)]

	B500 staven	B500 wapeningsnetten
hoofdwapening	8	6
flankwapening	5	5
beugels	5	5

min. afstand hoofdwapening (EC2, 8.2):
ø
$D + 5$ mm
20 mm

max. afstand flankwapening:
300 mm [1)]

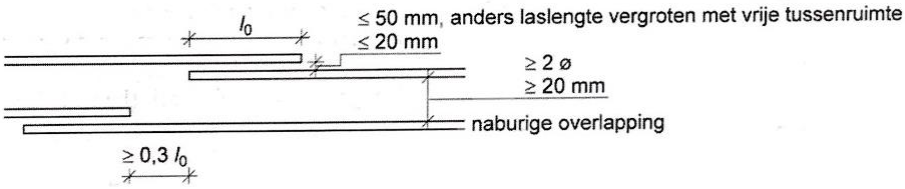
max. afstand verticale beugels,
geen dwarskrachtwapening vereist:
300 mm
dwarskrachtwapening vereist:
min.{0,75 d (1+cot α); 300 mm}



plus bovenin de balk:
voldoende afstand om trilapparaten in te brengen en om goed te kunnen storten en verdichten

richtlijn: ≥ 50 mm [1)]

Overlappingslas



Tabel 5.8 – Minimale staafafstand

Maximale staafdiameter

staalspanning σ_s (N/mm²)	maximale staafdiameter (mm)		
	w_k = 0,4 mm	w_k = 0,3 mm	w_k = 0,2 mm
160	40	32	25
200	32	25	16
240	20	16	12
280	16	12	8
320	12	10	6
360	10	8	5

Tabel 5.9 – Maximale staafdiameter

BIJLAGE 3

Milieuklasse	Gewapende en voorgespannen elementen met voorspanning zonder aanhechting	Voorgespannen elementen met voorspanning met aanhechting
	quasi-blijvende belastingscombinatie	frequente belastingscombinatie
X0, XC1	0,4 [1]	0,2
XC2, XC3, XC4	0,3	0,2 [2]
XD1, XD2, XD3, XS1, XS2, XS3		decompressie

OPMERKING 1 Voor de milieuklassen X0 en XC1 heeft de scheurwijdte geen invloed op de duurzaamheid; deze grens is gesteld om een in het algemeen aanvaardbaar uiterlijk te verkrijgen. Bij afwezigheid van voorwaarden ten aanzien van het uiterlijk mag deze beperking zijn afgezwakt.

OPMERKING 2 Voor deze milieuklassen behoort, aanvullend, decompressie onder de quasi-blijvende belastingscombinatie te zijn gecontroleerd.

Tabel 6.1 - Aanbevolen waarden van w_{max} (mm)

Tabel 22 Maximale staafdiameters $Ø_{max}$ in mm voor scheurbeperking*

	maximale staafdiameter		
staalspanning (N/mm²)	w_k = 0,4 mm	w_k = 0,3 mm	w_k = 0,2 mm
160	40	32	25
200	32	25	16
240	20	16	12
280	16	12	8
320	12	10	6
360	10	8	5

Noot: Ø moet worden omgerekend naar de maximale staafdiameter Ø volgens de formules 7.6 en 7.7 uit NEN-EN 1992-1-1*

Tabel 23 Maximale staafafstand s_{max} in mm voor scheurbeperking

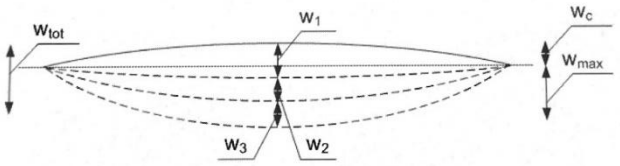
	maximale staafafstand		
staalspanning (N/mm²)	w_k = 0,4 mm	w_k = 0,3 mm	w_k = 0,2 mm
160	300	300	250
200	300	250	150
240	250	200	100
280	200	150	50
320	150	100	-
360	100	50	-

Tabel 6.2 – Maximale staafdiameter en staafafstand in mm voor scheurbeperking

>> vertical deformation

recommendations

w_c = precamber
w_1 = initial deflection under permanent actions
w_2 = long term deflection under permanent actions (creep)
w_3 = deflection under variable actions
$w_{tot} = w_1 + w_2 + w_3$
$w_{max} = w_{tot} - w_c$



As Eurocode does not specify deformation limits, the old limits originating in the Dutch code are used (NEN 6702 Belastingen en vervormingen TGB 1990).

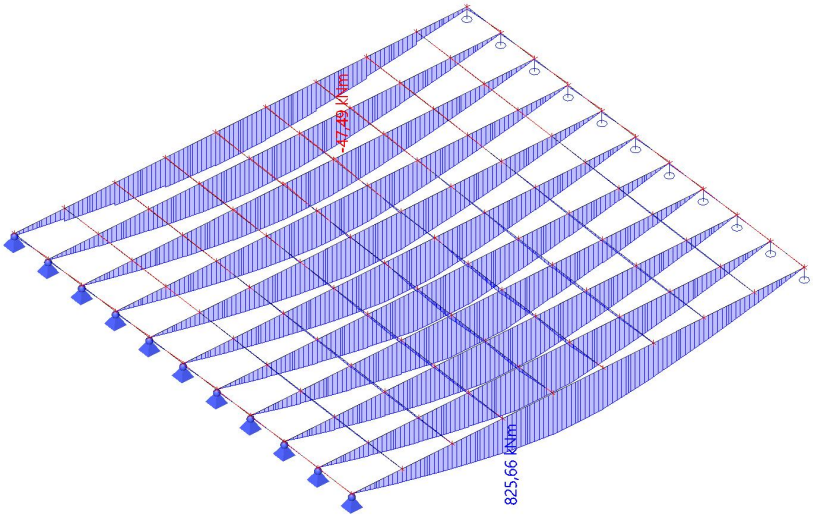
Floors in general	w_3 = 0,003 x l
Floors carrying non-flexible walls	w_3 = 0,002 x l
Roofs	w_3 = 0,004 x l
Maximum deflection	w_{max} = 0,004 x l

Tabel 6.3 – Deformation limits

BIJLAGE 4

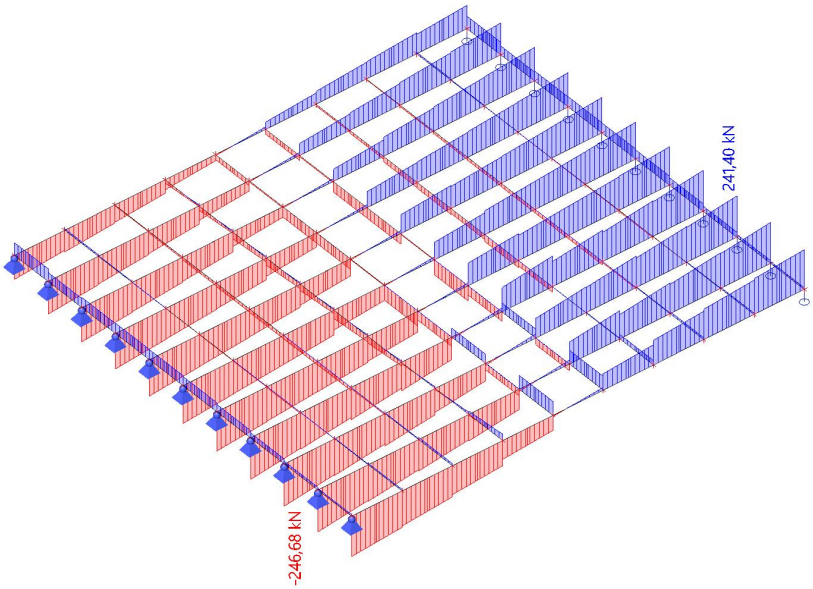
1. Interne 1D-krachten; M_y

Waardes: $\mathbf{M_y}$
Lineaire berekening
Combinatie: Combi1
Assenstelsel: Hoofd
Extreme 1D: Globaal
Selectie: S2..S11, S13..S32, S34..S88,
S90..S98, S129..S131, S137..S141,
S144..S154, S159, S166..S250



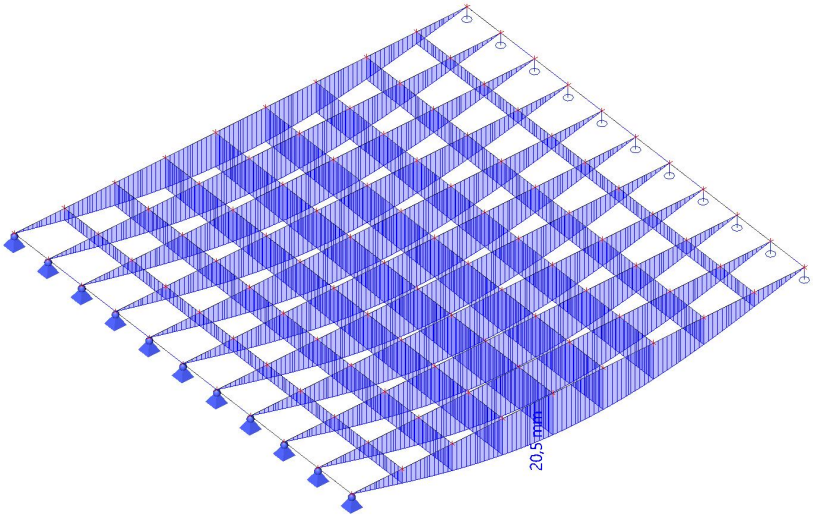
2. Interne 1D-krachten; V_z

Waardes: $\mathbf{V_z}$
Lineaire berekening
Combinatie: Combi1
Assenstelsel: Hoofd
Extreme 1D: Globaal
Selectie: S2..S11, S13..S32, S34..S88,
S90..S98, S129..S131, S137..S141,
S144..S154, S159, S166..S250



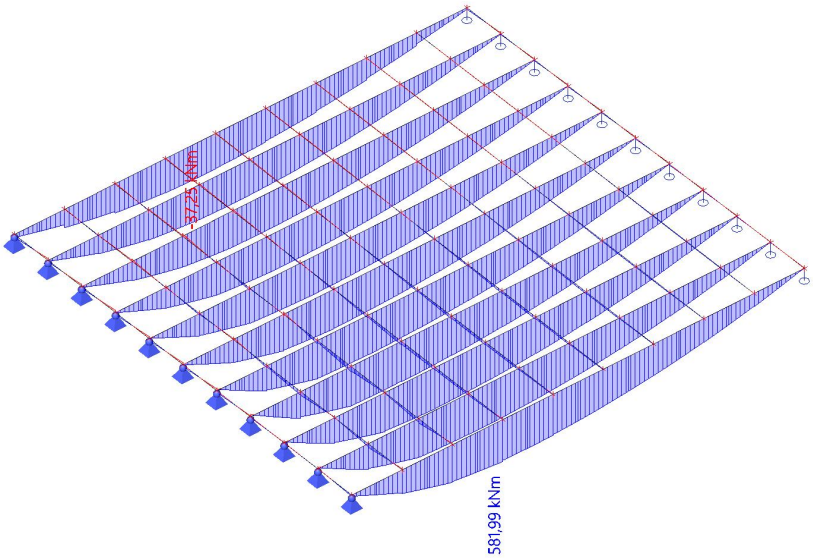
3. 1D-vervormingen; U_total

Waardes: $\mathbf{U_{total}}$
Lineaire berekening
Combinatie: Combi1
Assenstelsel: Globaal
Extreme 1D: Globaal
Selectie: S2..S11, S13..S32, S34..S88,
S90..S98, S129..S131, S137..S141,
S144..S154, S159, S166..S250



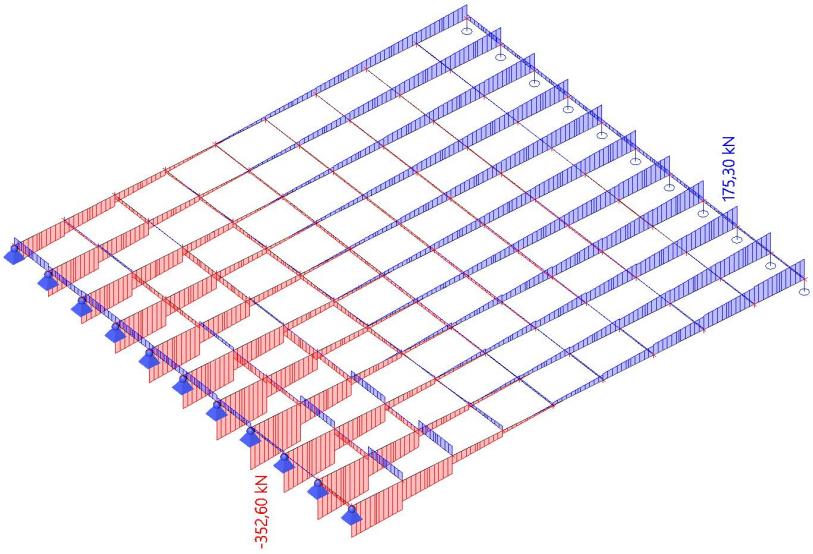
4. Interne 1D-krachten; M_y

Waardes: $\mathbf{M_y}$
Lineaire berekening
Combinatie: Combi2
Assenstelsel: Hoofd
Extreme 1D: Globaal
Selectie: S2..S11, S13..S32, S34..S88,
S90..S98, S129..S131, S137..S141,
S144..S154, S159, S166..S250



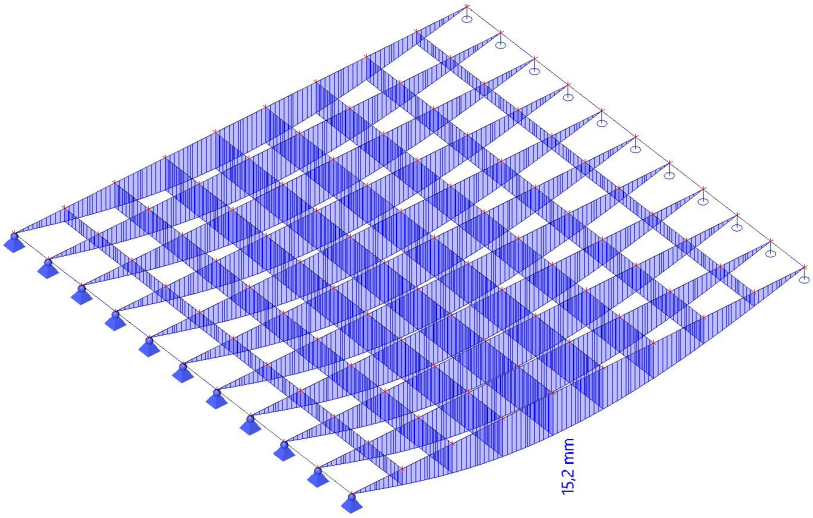
5. Interne 1D-krachten; V_z

Waardes: $\mathbf{V_z}$
Lineaire berekening
Combinatie: Combi2
Assenstelsel: Hoofd
Extreme 1D: Globaal
Selectie: S2..S11, S13..S32, S34..S88,
S90..S98, S129..S131, S137..S141,
S144..S154, S159, S166..S250



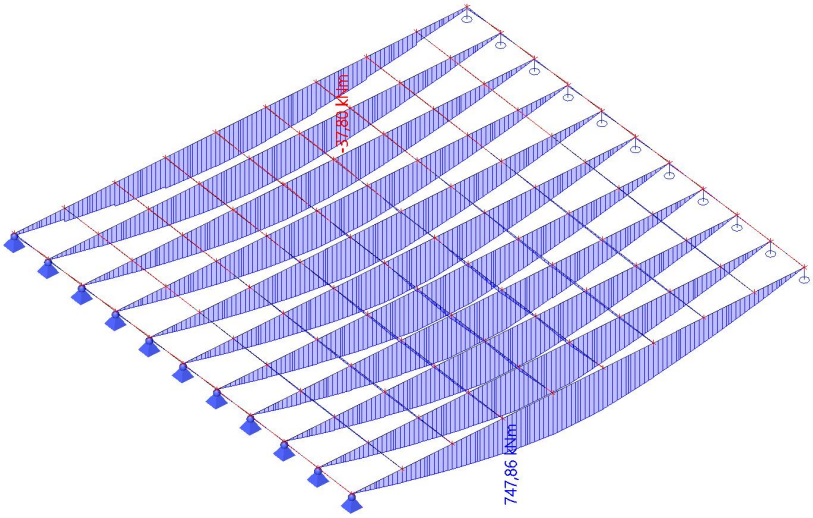
6. 1D-vervormingen; U_total

Waardes: $\mathbf{U_{total}}$
Lineaire berekening
Combinatie: Combi2
Assenstelsel: Globaal
Extreme 1D: Globaal
Selectie: S2..S11, S13..S32, S34..S88,
S90..S98, S129..S131, S137..S141,
S144..S154, S159, S166..S250



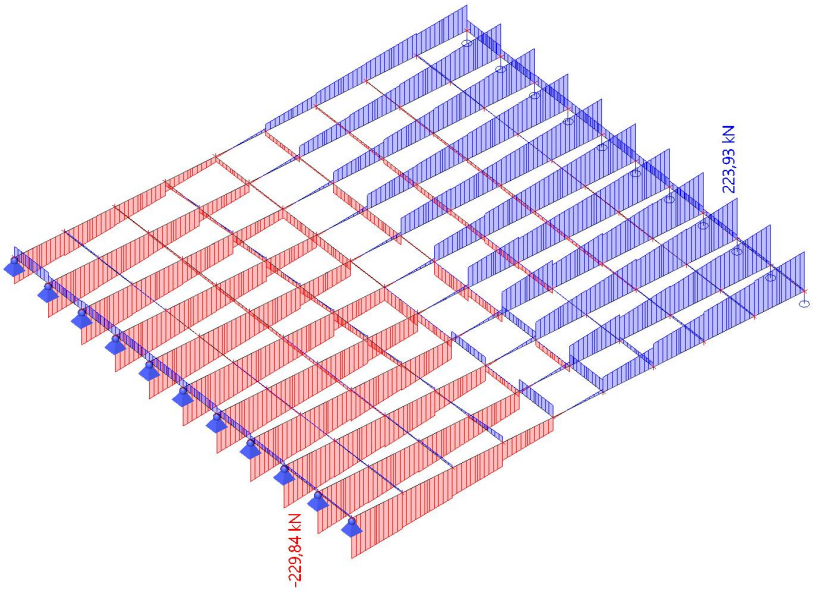
7. Interne 1D-krachten; M_y

Waardes: $\mathbf{M_y}$
Lineaire berekening
Combinatie: Combi3
Assenstelsel: Hoofd
Extreme 1D: Globaal
Selectie: S2..S11, S13..S32, S34..S88,
S90..S98, S129..S131, S137..S141,
S144..S154, S159, S166..S250



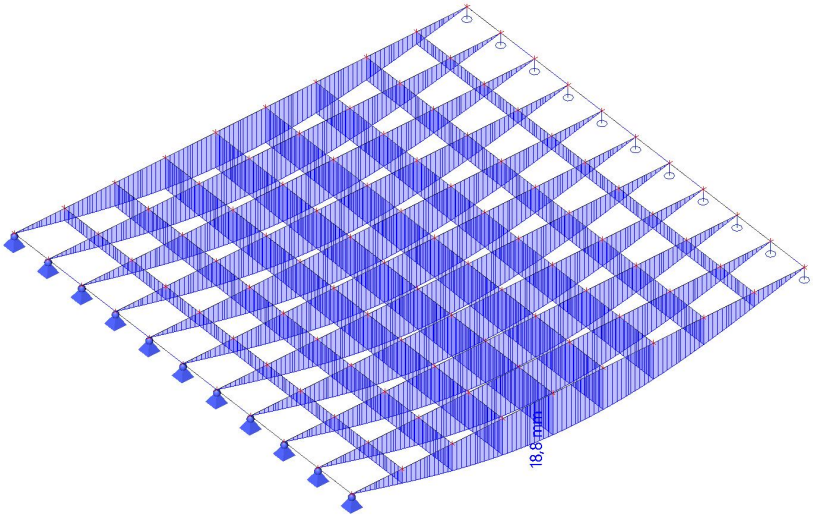
8. Interne 1D-krachten; V_z

Waardes: $\mathbf{V_z}$
Lineaire berekening
Combinatie: Combi3
Assenstelsel: Hoofd
Extreme 1D: Globaal
Selectie: S2..S11, S13..S32, S34..S88,
S90..S98, S129..S131, S137..S141,
S144..S154, S159, S166..S250



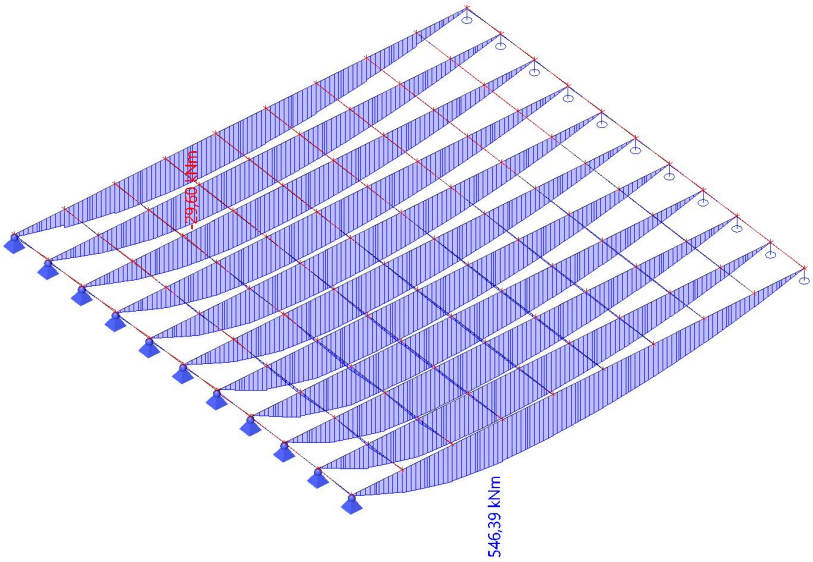
9. 1D-vervormingen; U_total

Waardes: $\mathbf{U_{total}}$
Lineaire berekening
Combinatie: Combi3
Assenstelsel: Globaal
Extreme 1D: Globaal
Selectie: S2..S11, S13..S32, S34..S88, S90..S98, S129..S131, S137..S141, S144..S154, S159, S166..S250



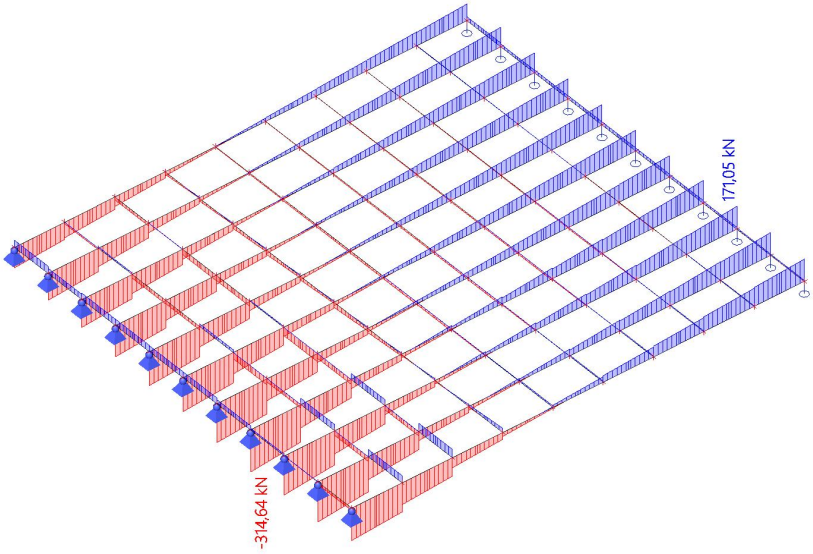
10. Interne 1D-krachten; M_y

Waardes: $\mathbf{M_y}$
Lineaire berekening
Combinatie: Combi4
Assenstelsel: Hoofd
Extreme 1D: Globaal
Selectie: S2..S11, S13..S32, S34..S88, S90..S98, S129..S131, S137..S141, S144..S154, S159, S166..S250



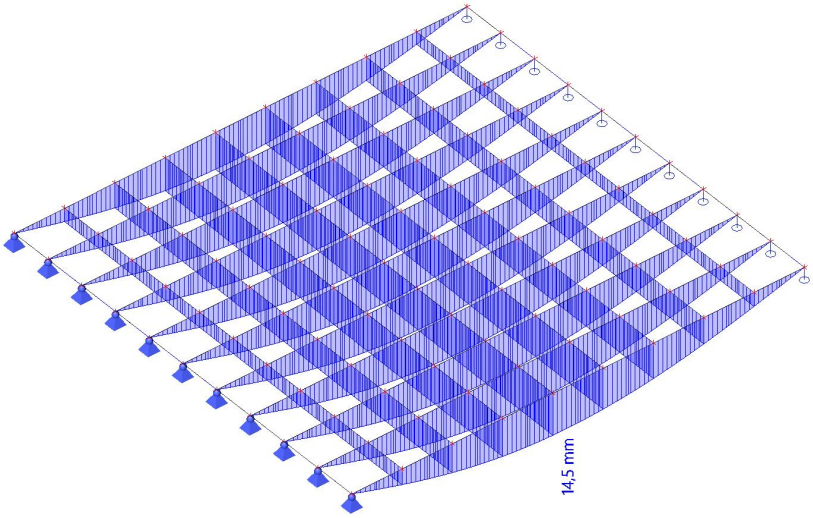
11. Interne 1D-krachten; V_z

Waardes: $\mathbf{V_z}$
Lineaire berekening
Combinatie: Combi4
Assenstelsel: Hoofd
Extreme 1D: Globaal
Selectie: S2..S11, S13..S32, S34..S88,
S90..S98, S129..S131, S137..S141,
S144..S154, S159, S166..S250



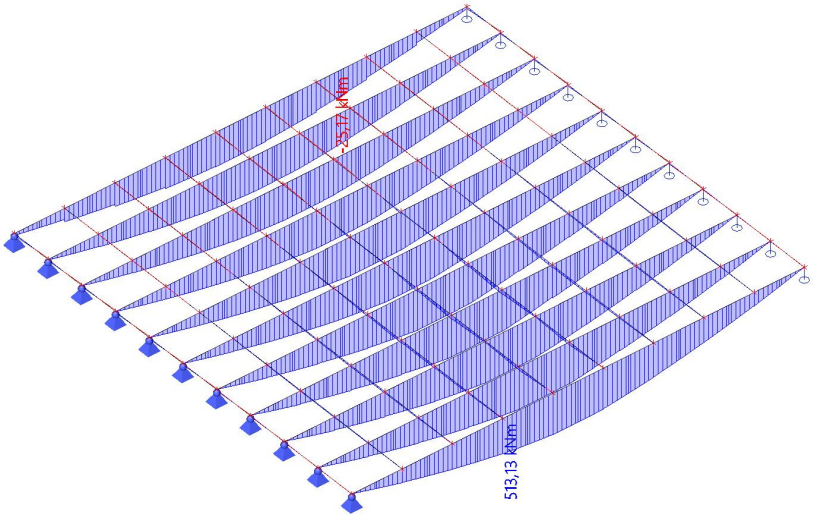
12. 1D-vervormingen; U_total

Waardes: $\mathbf{U_{total}}$
Lineaire berekening
Combinatie: Combi4
Assenstelsel: Globaal
Extreme 1D: Globaal
Selectie: S2..S11, S13..S32, S34..S88,
S90..S98, S129..S131, S137..S141,
S144..S154, S159, S166..S250



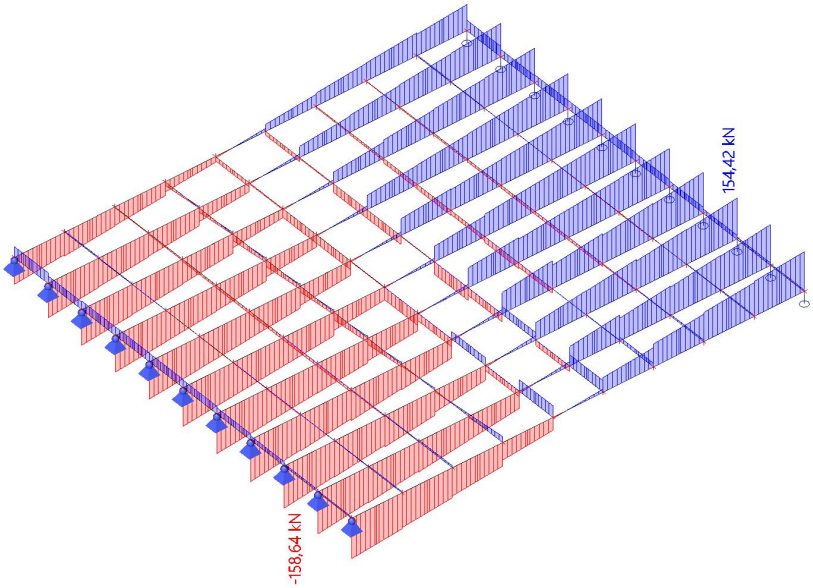
13. Interne 1D-krachten; M_y

Waardes: $\mathbf{M_y}$
Lineaire berekening
Combinatie: Combi5
Assenstelsel: Hoofd
Extreme 1D: Globaal
Selectie: S2..S11, S13..S32, S34..S88,
S90..S98, S129..S131, S137..S141,
S144..S154, S159, S166..S250



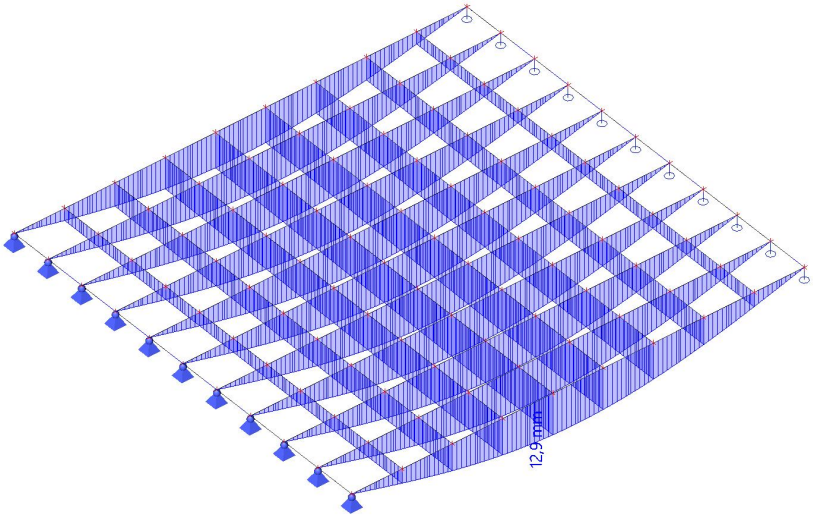
14. Interne 1D-krachten; V_z

Waardes: $\mathbf{V_z}$
Lineaire berekening
Combinatie: Combi5
Assenstelsel: Hoofd
Extreme 1D: Globaal
Selectie: S2..S11, S13..S32, S34..S88,
S90..S98, S129..S131, S137..S141,
S144..S154, S159, S166..S250



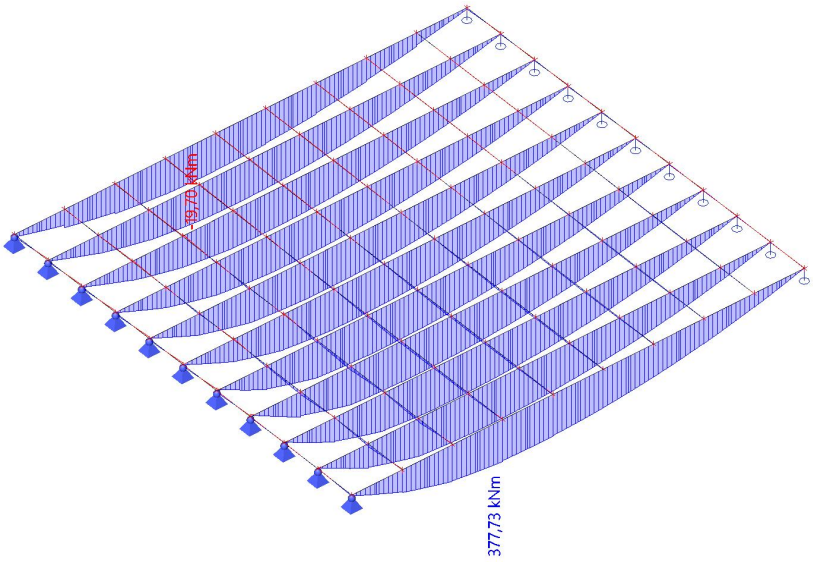
15. 1D-vervormingen; U_total

Waardes: $\mathbf{U_{total}}$
Lineaire berekening
Combinatie: Combi5
Assenstelsel: Globaal
Extreme 1D: Globaal
Selectie: S2..S11, S13..S32, S34..S88,
S90..S98, S129..S131, S137..S141,
S144..S154, S159, S166..S250



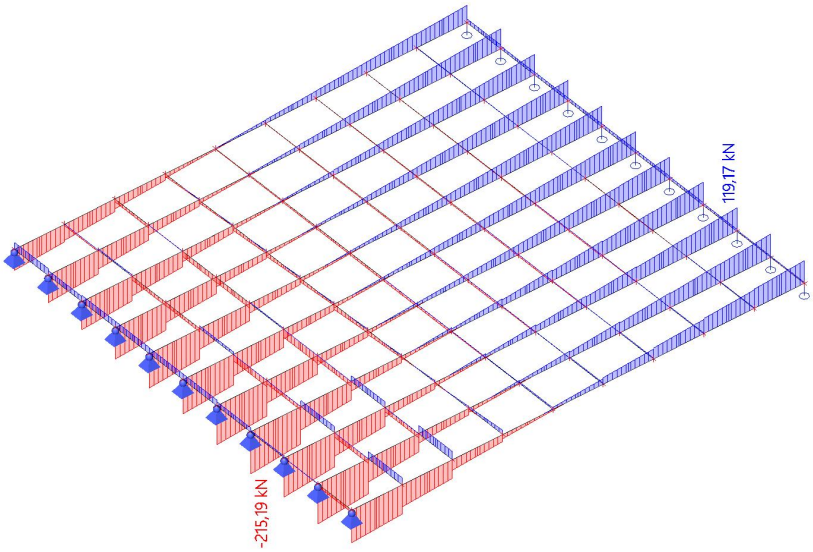
16. Interne 1D-krachten; M_y

Waardes: $\mathbf{M_y}$
Lineaire berekening
Combinatie: Combi6
Assenstelsel: Hoofd
Extreme 1D: Globaal
Selectie: S2..S11, S13..S32, S34..S88,
S90..S98, S129..S131, S137..S141,
S144..S154, S159, S166..S250



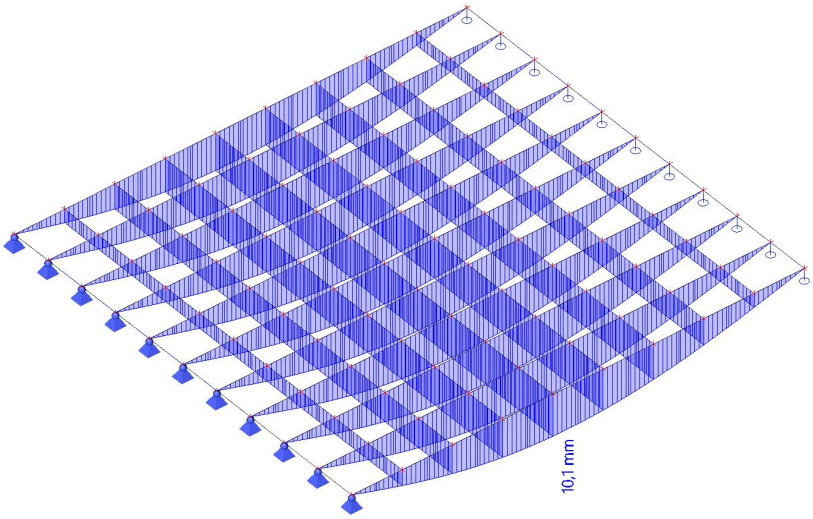
17. Interne 1D-krachten; V_z

Waardes: $\mathbf{V_z}$
Lineaire berekening
Combinatie: Combi6
Assenstelsel: Hoofd
Extreme 1D: Globaal
Selectie: S2..S11, S13..S32, S34..S88, S90..S98, S129..S131, S137..S141, S144..S154, S159, S166..S250



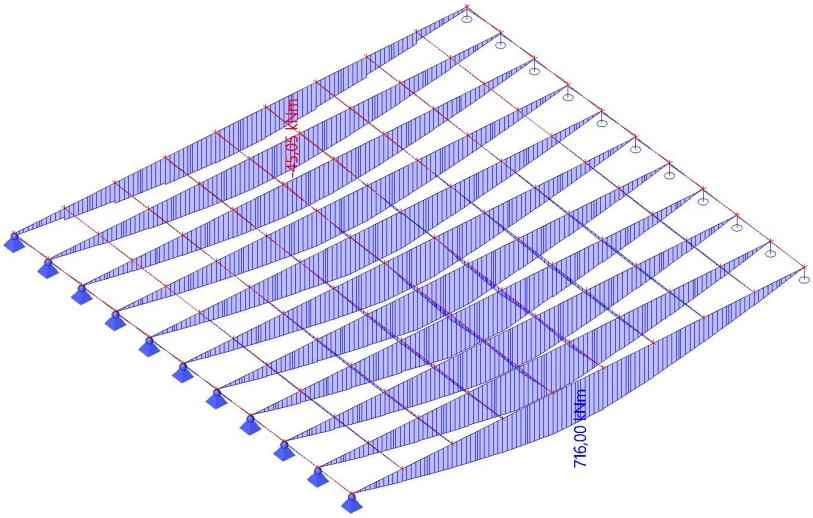
18. 1D-vervormingen; U_total

Waardes: $\mathbf{U_{total}}$
Lineaire berekening
Combinatie: Combi6
Assenstelsel: Globaal
Extreme 1D: Globaal
Selectie: S2..S11, S13..S32, S34..S88, S90..S98, S129..S131, S137..S141, S144..S154, S159, S166..S250



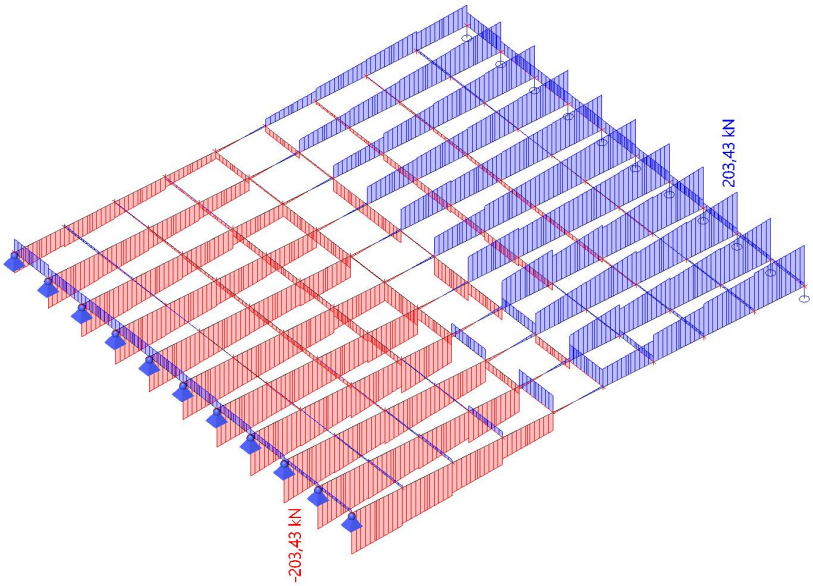
1. Interne 1D-krachten; M_y

Waardes: $\mathbf{M_y}$
Lineaire berekening
Combinatie: Combi1
Assenstelsel: Hoofd
Extreme 1D: Globaal
Selectie: S2..S11, S13..S32, S34..S88,
S90..S98, S129..S131, S137..S141,
S144..S154, S159, S166..S250



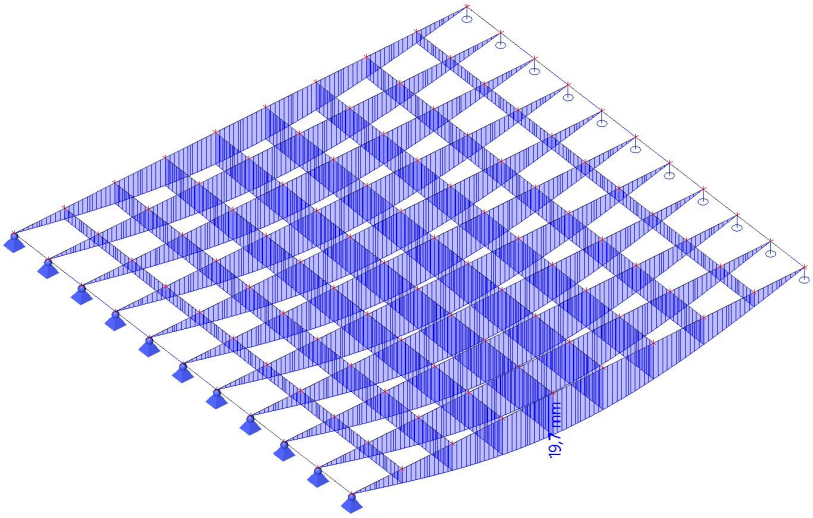
2. Interne 1D-krachten; V_z

Waardes: $\mathbf{V_z}$
Lineaire berekening
Combinatie: Combi1
Assenstelsel: Hoofd
Extreme 1D: Globaal
Selectie: S2..S11, S13..S32, S34..S88,
S90..S98, S129..S131, S137..S141,
S144..S154, S159, S166..S250



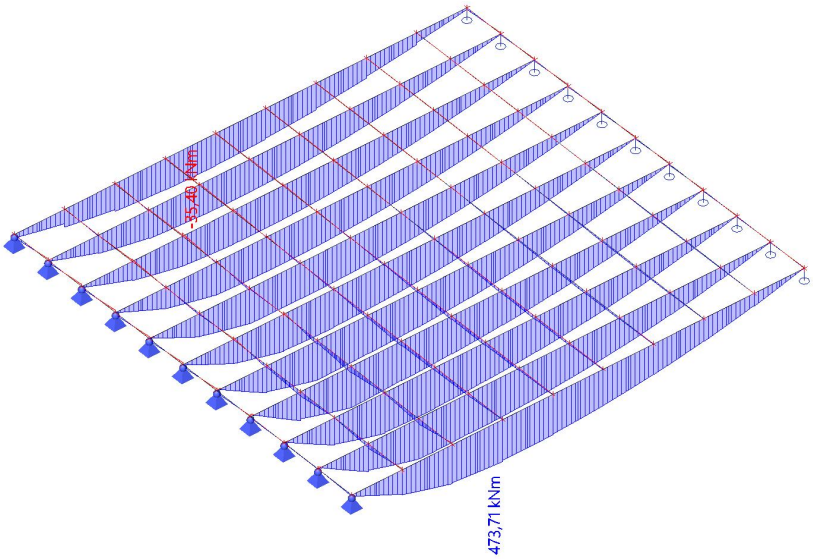
3. 1D-vervormingen; U_total

Waardes: $\mathbf{U_{total}}$
Lineaire berekening
Combinatie: Combi1
Assenstelsel: Globaal
Extreme 1D: Globaal
Selectie: S2..S11, S13..S32, S34..S88,
S90..S98, S129..S131, S137..S141,
S144..S154, S159, S166..S250



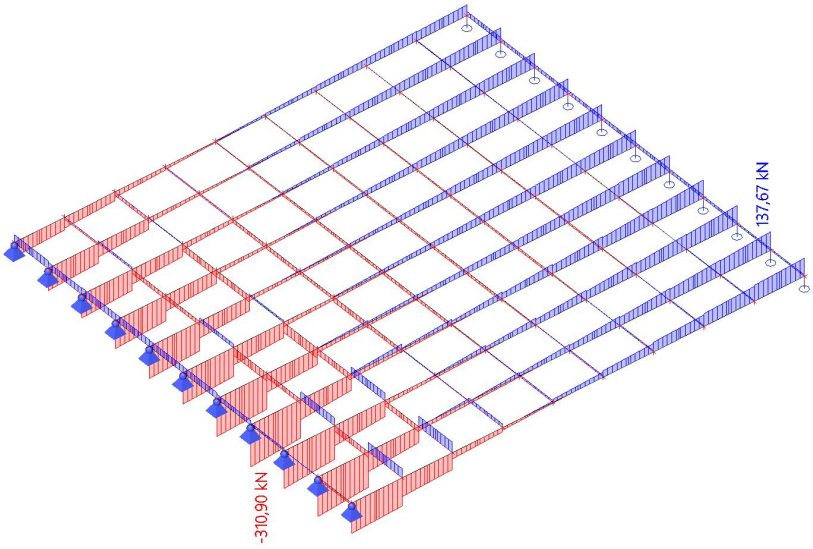
4. Interne 1D-krachten; M_y

Waardes: $\mathbf{M_y}$
Lineaire berekening
Combinatie: Combi2
Assenstelsel: Hoofd
Extreme 1D: Globaal
Selectie: S2..S11, S13..S32, S34..S88,
S90..S98, S129..S131, S137..S141,
S144..S154, S159, S166..S250



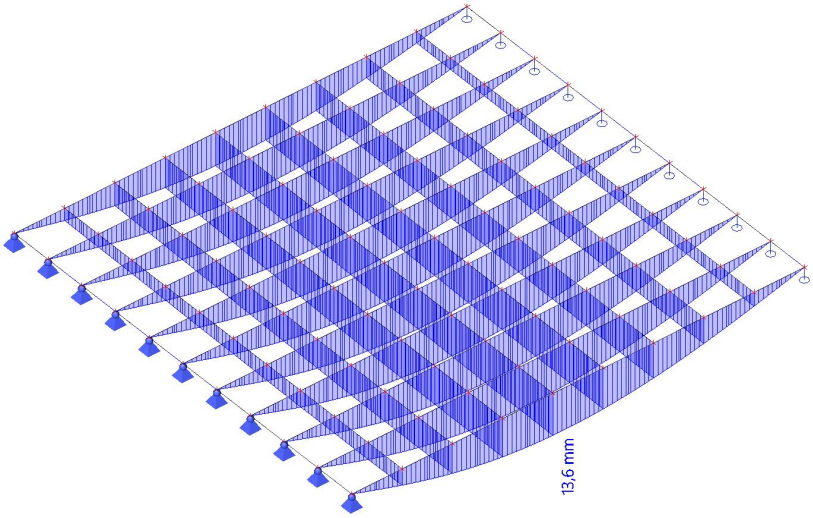
5. Interne 1D-krachten; V_z

Waardes: $\mathbf{V_z}$
Lineaire berekening
Combinatie: Combi2
Assenstelsel: Hoofd
Extreme 1D: Globaal
Selectie: S2..S11, S13..S32, S34..S88, S90..S98, S129..S131, S137..S141, S144..S154, S159, S166..S250



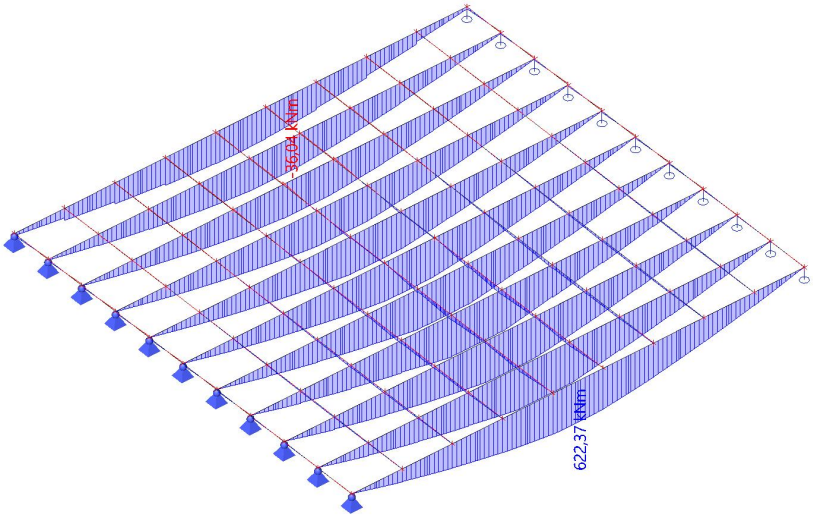
6. 1D-vervormingen; U_total

Waardes: $\mathbf{U_{total}}$
Lineaire berekening
Combinatie: Combi2
Assenstelsel: Globaal
Extreme 1D: Globaal
Selectie: S2..S11, S13..S32, S34..S88, S90..S98, S129..S131, S137..S141, S144..S154, S159, S166..S250



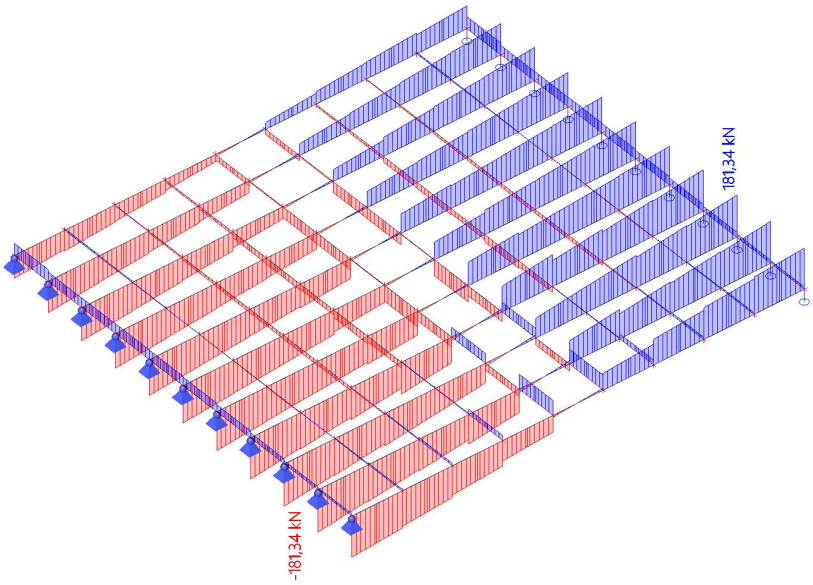
7. Interne 1D-krachten; M_y

Waardes: $\mathbf{M_y}$
Lineaire berekening
Combinatie: Combi3
Assenstelsel: Hoofd
Extreme 1D: Globaal
Selectie: S2..S11, S13..S32, S34..S88,
S90..S98, S129..S131, S137..S141,
S144..S154, S159, S166..S250



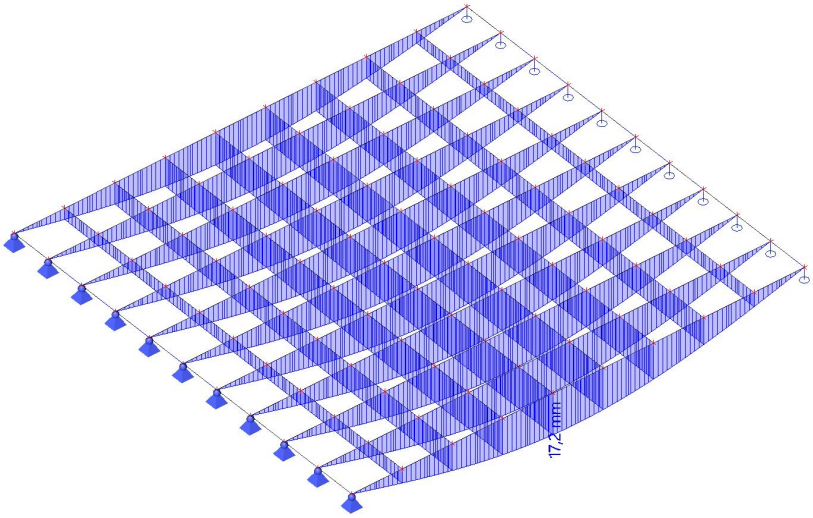
8. Interne 1D-krachten; V_z

Waardes: $\mathbf{V_z}$
Lineaire berekening
Combinatie: Combi3
Assenstelsel: Hoofd
Extreme 1D: Globaal
Selectie: S2..S11, S13..S32, S34..S88,
S90..S98, S129..S131, S137..S141,
S144..S154, S159, S166..S250



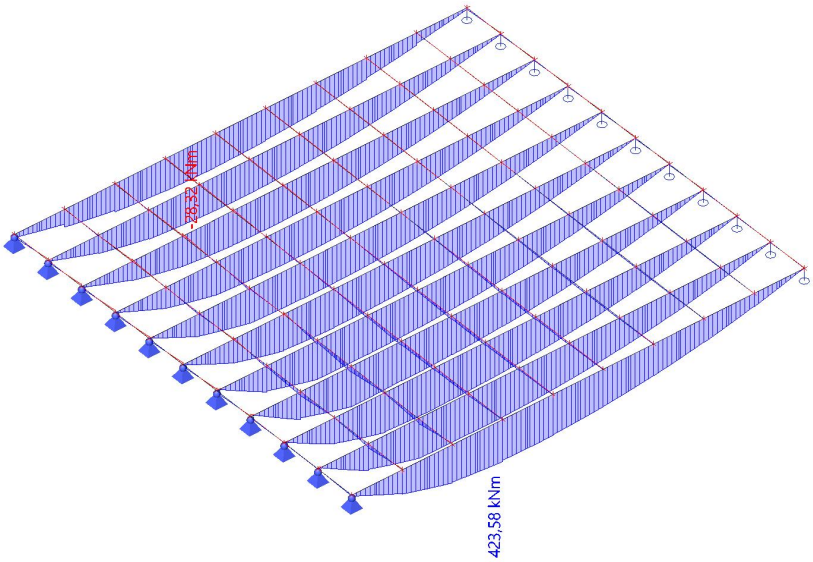
9. 1D-vervormingen; U_total

Waardes: $\mathbf{U_{total}}$
Lineaire berekening
Combinatie: Combi3
Assenstelsel: Globaal
Extreme 1D: Globaal
Selectie: S2..S11, S13..S32, S34..S88,
S90..S98, S129..S131, S137..S141,
S144..S154, S159, S166..S250



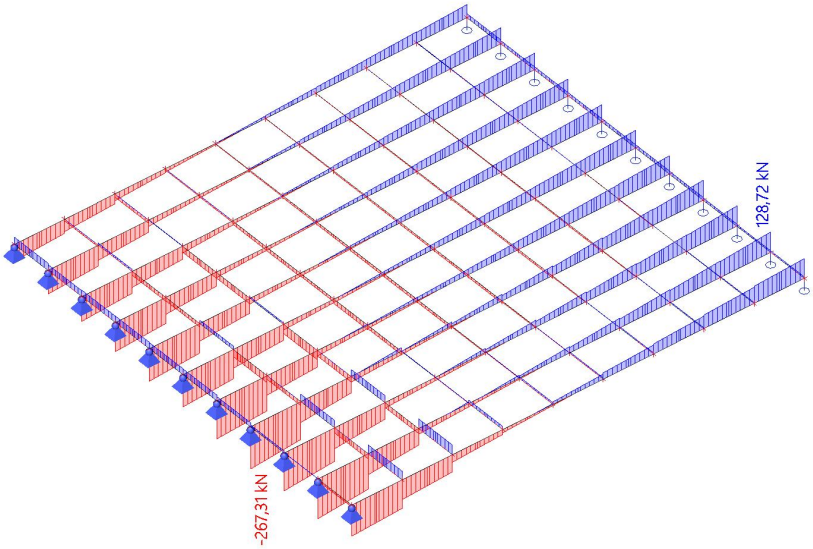
10. Interne 1D-krachten; M_y

Waardes: $\mathbf{M_y}$
Lineaire berekening
Combinatie: Combi4
Assenstelsel: Hoofd
Extreme 1D: Globaal
Selectie: S2..S11, S13..S32, S34..S88,
S90..S98, S129..S131, S137..S141,
S144..S154, S159, S166..S250



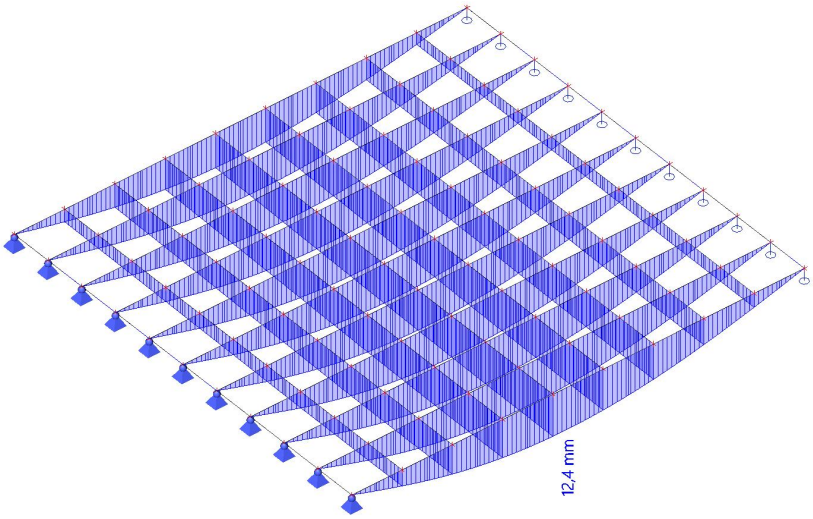
11. Interne 1D-krachten; V_z

Waardes: $\mathbf{V_z}$
Lineaire berekening
Combinatie: Combi4
Assenstelsel: Hoofd
Extreme 1D: Globaal
Selectie: S2..S11, S13..S32, S34..S88,
S90..S98, S129..S131, S137..S141,
S144..S154, S159, S166..S250



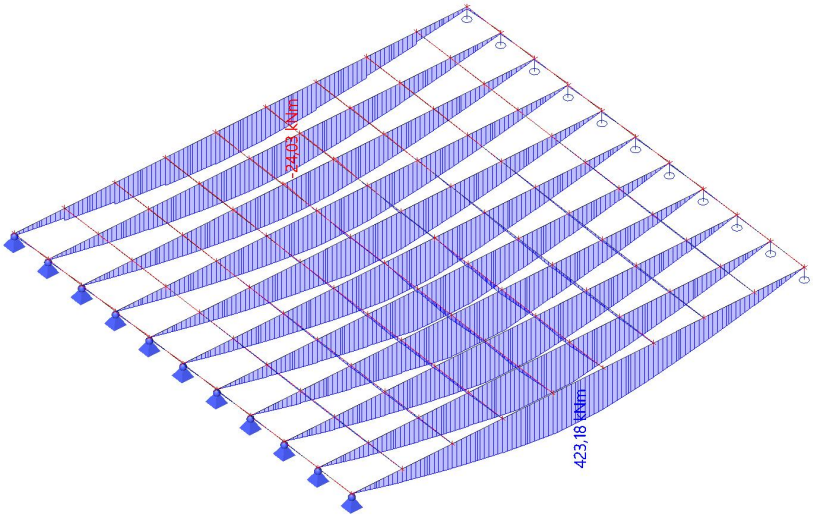
12. 1D-vervormingen; U_total

Waardes: $\mathbf{U_{total}}$
Lineaire berekening
Combinatie: Combi4
Assenstelsel: Globaal
Extreme 1D: Globaal
Selectie: S2..S11, S13..S32, S34..S88,
S90..S98, S129..S131, S137..S141,
S144..S154, S159, S166..S250



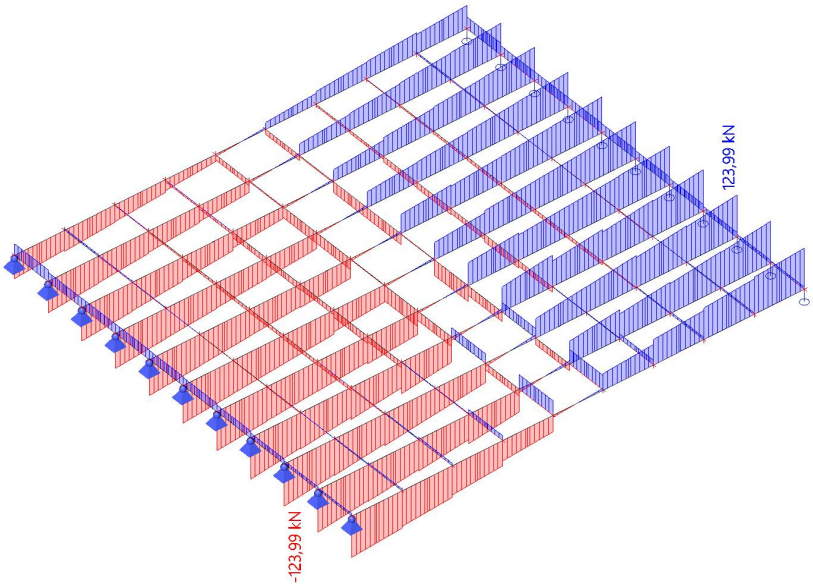
13. Interne 1D-krachten; M_y

Waardes: $\mathbf{M_y}$
Lineaire berekening
Combinatie: Combi5
Assenstelsel: Hoofd
Extreme 1D: Globaal
Selectie: S2..S11, S13..S32, S34..S88,
S90..S98, S129..S131, S137..S141,
S144..S154, S159, S166..S250



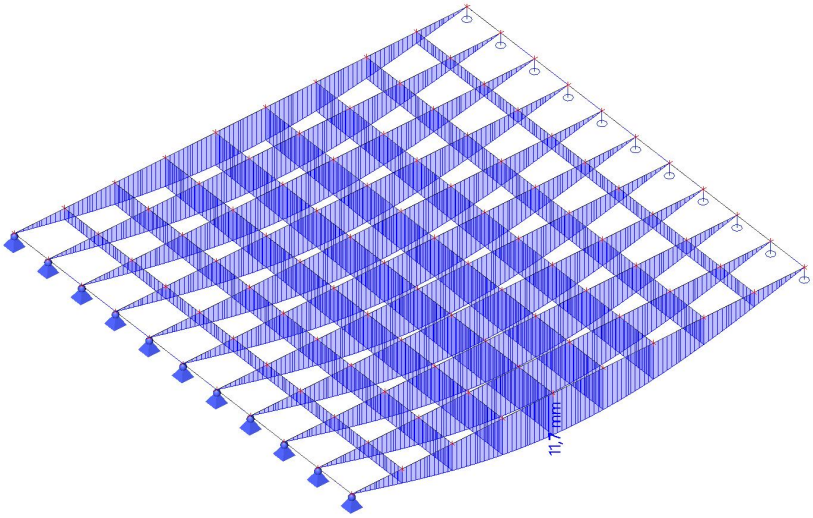
14. Interne 1D-krachten; V_z

Waardes: $\mathbf{V_z}$
Lineaire berekening
Combinatie: Combi5
Assenstelsel: Hoofd
Extreme 1D: Globaal
Selectie: S2..S11, S13..S32, S34..S88,
S90..S98, S129..S131, S137..S141,
S144..S154, S159, S166..S250



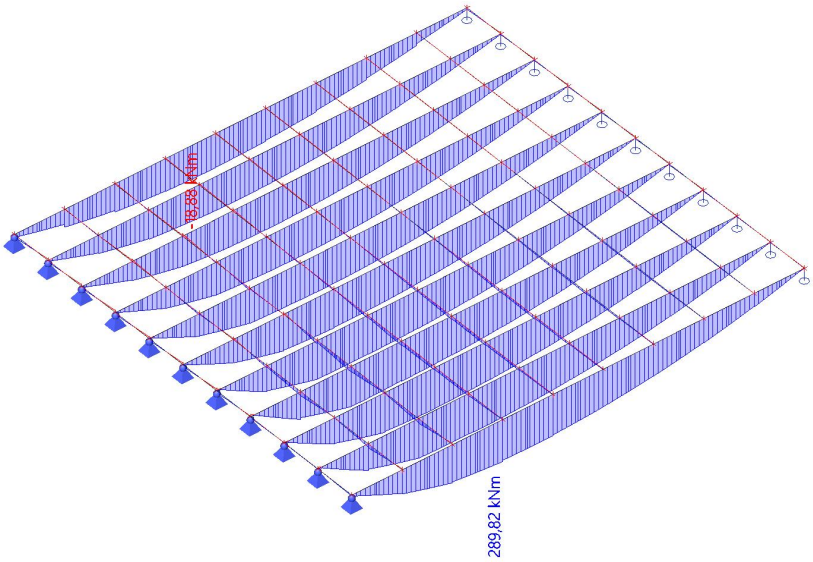
15. 1D-vervormingen; U_total

Waardes: $\mathbf{U_{total}}$
Lineaire berekening
Combinatie: Combi5
Assenstelsel: Globaal
Extreme 1D: Globaal
Selectie: S2..S11, S13..S32, S34..S88, S90..S98, S129..S131, S137..S141, S144..S154, S159, S166..S250



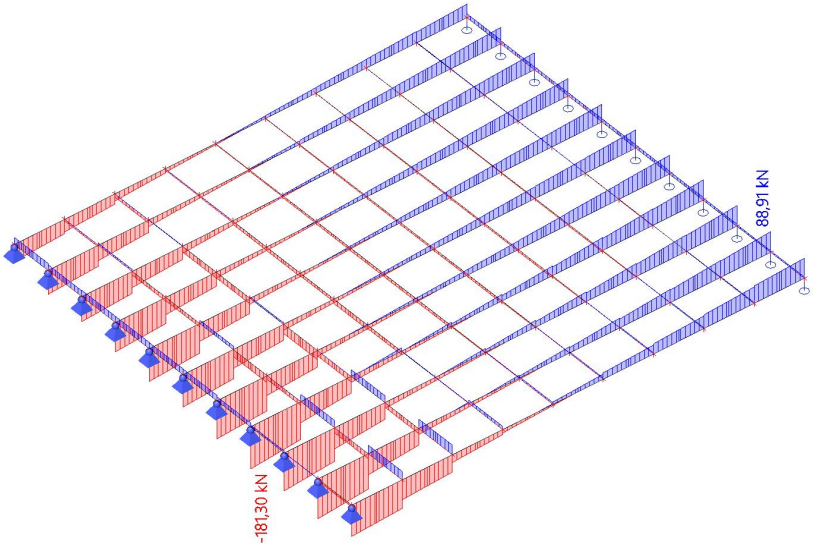
16. Interne 1D-krachten; M_y

Waardes: $\mathbf{M_y}$
Lineaire berekening
Combinatie: Combi6
Assenstelsel: Hoofd
Extreme 1D: Globaal
Selectie: S2..S11, S13..S32, S34..S88, S90..S98, S129..S131, S137..S141, S144..S154, S159, S166..S250



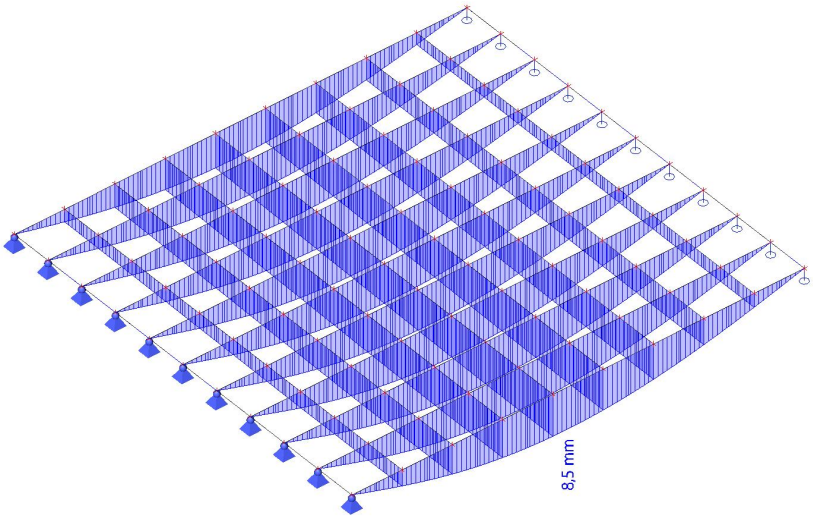
17. Interne 1D-krachten; V_z

Waardes: $\mathbf{V_z}$
Lineaire berekening
Combinatie: Combi6
Assenstelsel: Hoofd
Extreme 1D: Globaal
Selectie: S2..S11, S13..S32, S34..S88,
S90..S98, S129..S131, S137..S141,
S144..S154, S159, S166..S250



18. 1D-vervormingen; U_total

Waardes: $\mathbf{U_{total}}$
Lineaire berekening
Combinatie: Combi6
Assenstelsel: Globaal
Extreme 1D: Globaal
Selectie: S2..S11, S13..S32, S34..S88,
S90..S98, S129..S131, S137..S141,
S144..S154, S159, S166..S250



BIJLAGE 5

Massieve doorsnede

Overspanning 10.4 meter

In [1]:

```
import matplotlib.pyplot as plt
%matplotlib inline
import numpy as np
```

In [2]:

```
#REKENWAARDEN BETON EN STAAL

acc = 1
fck = 30
yc = 1.5
fcd = acc * fck /yc
print('fcd =',fcd, 'MPa')

act = 1
fctk005 = 2
fctd = act * fctk005 /yc
print('fctd =',fctd, 'MPa')

fyk = 500
ys = 1.15
fyd = fyk / ys
print('fyd =',fyd, 'MPa')
```

```
fcd = 20.0 MPa
fctd = 1.3333333333333333 MPa
fyd = 434.7826086956522 MPa
```

In [3]:

```
#MINIMALE DEKKING

cmin = 30
cnom = cmin
c = 45

print('c =', c, 'mm')
```

```
c = 45 mm
```

In [4]:

```
#EERSTE SCHATTINGEN VAN DE DOORSNEDE


h = 550
b = 1000
L = 10.8 * 10e2


o_beugel = 16
o_wapening = 32


print('h =', h, 'mm')
print('b =', b, 'mm')


print('')


print('obeugel =', o_beugel, 'mm')
print('owapening =', o_wapening, 'mm')
```

```
h = 550 mm
b = 1000 mm

obeugel = 16 mm
owapening = 32 mm
```

In [5]:

```
#BUIGING
```

In [6]:

```
#MAATGEVEND BUIGEND MOMENT


MEd = 825.7 * 10e5
print('MEd =', MEd, 'Nmm')
```

```
MEd = 825700000.0 Nmm
```

In [7]:

```
#MINIMUMOPPERVLAKTE VAN BETONSTAAL
```

```
fctm = 2.9
W = 1/6 * b * h**2
Mrep = W * fctm
print('W =', W, 'mm3')
print('Mrep =', Mrep, 'Nmm')

print('')

d = h - c - o_beugel - 1/2 * o_wapening
z = 0.9 * d
print('d =', d, 'mm')
print('z_schatting =', z, 'mm')

print('')

Asmin = Mrep / (z * fyd)
print('Asmin =', Asmin, 'mm2')
```

```
W = 50416666.666666664 mm3
Mrep = 146208333.3333333 Nmm

d = 473.0 mm
z_schatting = 425.7 mm

Asmin = 789.9440137812229 mm2
```

In [8]:

```
#CONTROLE OP DIMENSIONERING BALK

Ns = MEd / z
Nc = Ns
As = Ns / fyd

alfa = 0.75
xu = Nc / (alfa * b * fcd)
print('xu_schatting =', xu, 'mm')

xumax = 0.448 * d
print('xumax =', xumax, 'mm')

print('')

if xu <= xumax:
```

```
    print('Drukwapening hoeft niet toegepast te worden.')
else:
    print('Drukwapening moet toegepast worden.')
```

```
xu_schatting = 129.30858977370605 mm
xumax = 211.904 mm

Drukwapening hoeft niet toegepast te worden.
```

In [9]:

```
#BEREKENING VEREISTE HOEVEELHEID BUIGWAPENING

beta = 0.389
formule_a = -(alfa * fcd * b * beta)
formule_b = alfa * fcd * b * d
formule_c = -(MEd)
D = formule_b**2 - 4 * formule_a * formule_c
xu1 = ( -formule_b + np.sqrt(D)) / (2 * formule_a)
xu2 = ( -formule_b - np.sqrt(D)) / (2 * formule_a)

xu = xu1
print('xu_exact =', xu, 'mm')

z = d - beta * xu
print('z_exact =', z, 'mm')

Nc = alfa * fcd * b * xu
Ns = Nc
As = Ns / fyd

print('')

As_1staaf = 1/4 * np.pi * o_wapening**2
n = As / As_1staaf
print('Onafgerond aantal staven is', n)

As_nieuw = n * 1/4 * np.pi * o_wapening**2
print('De vereiste hoeveelheid wapening ivm buiging As =', As_nieuw, 'mm2')
print(6, 'staven', o_wapening)

n = 6
As_nieuw = n * 1/4 * np.pi * o_wapening**2
```

```
p = As_nieuw / (b * d)
print('p =', p)


print('')


#De bovenste hoeveelheid wapening moest groter worden ivm scheurbeheersing
n = 10
As_nieuw = n * 1/4 * np.pi * o_wapening**2
print('De vereiste hoeveelheid wapening ivm scheurbeheersing As =', As_nieuw, 'mm2'
)
print(n, 'staven', o_wapening)


Ac = h * b
p = As_nieuw / (b * d)
print('p =', p)
print('De afstand tussen de staven is', (b - 2 * (c + o_beugel)- n * o_wapening) /
(n - 1), 'mm')


print('')


if (Asmin < As_nieuw) == False:
        print('Er is te weinig wapening toegepast.')
else:
    print('Er is genoeg wapening toegepast.')


if o_wapening <= 32:
    print('De wapeningsstaven zijn niet te groot.')
else:
    print('De wapeningsstaven zijn te groot.')


if ((b - 2 * (c + o_beugel) - n * o_wapening) / (n - 1)) > 36.5:
    print('De afstanden tussen wapeningsstaven zijn groot genoeg.')
else:
    print('De afstanden tussen wapeningsstaven zijn te klein.')


print('')


MRd = As_nieuw * fyd * z
print('MRd =', MRd, 'Nmm')


UC = MEd / MRd
print('Unity Check =', UC)
```

```
xu_exact = 130.35178509785504 mm
z_exact = 422.2931555969344 mm

Onafgerond aantal staven is 5.591730604699806
De vereiste hoeveelheid wapening ivm buiging As = 4497.136585875999 mm2
6 staven 32
p = 0.010201873817999835

De vereiste hoeveelheid wapening ivm scheurbeheersing As = 8042.47719318987 mm2
10 staven 32
p = 0.017003123029999727
De afstand tussen de staven is 62.0 mm

Er is genoeg wapening toegepast.
De wapeningsstaven zijn niet te groot.
De afstanden tussen wapeningsstaven zijn groot genoeg.

MRd = 1476644814.2297943 Nmm
Unity Check = 0.5591730604699806
```

In [10]:

```
#DWARSKRACHT
```

In [11]:

```
#MAATGEVENDE DWARSKRACHT


VEd = 352.6 * 10e2
print('VEd =', VEd, 'N')
```

```
VEd = 352600.0 N
```

In [12]:

```
#CONTROLE DWARSKRACHT ZONDER WAPENING


k = 1 + np.sqrt(200 / d)
if k > 2:
        k = 2
vmin = 0.035 * k**(3/2) * fck**(1/2)


k1 = 0.15
sigma_cp = 0
VRdc = (vmin + k1 * sigma_cp) * b * d
print('VRdc_ondergrens =', VRdc, 'N')


CRdc = 0.12
VRdc = (CRdc * k * (100 * p * fck )**(1/3) + k1 * sigma_cp) * b * d
```

```
print('VRdc =', VRdc, 'N')


print('')


if (VEd < VRdc) == False:
        print('De dwarskrachtwapening is nodig.')
else:
    print('De dwarskrachtwapening is niet nodig.')
```

```
VRdc_ondergrens = 192228.07998470427 N
VRdc = 347384.4556445137 N

De dwarskrachtwapening is nodig.
```

In [13]:

```
#BEREKENING DWARSKRACHTWAPENING


Asw = 2 * 1/4 * np.pi * o_beugel**2
print('Asw =', Asw, 'mm2')


θ = 21.8 / 180 * np.pi
s = Asw * z * fyd / (np.tan(θ) * VEd) #De hoek θ kan worden gekozen tussen 21.8° en
 45° (cotθ = 2.5 resp. 1.0)
print('s =', s, 'mm')


sl = 0.75 * d
print('sl_max =', sl, 'mm')


print('')


if s > sl:
    s = sl


if s < 600:
    print('De afstand tussen de beugels mag maximaal', s, 'mm zijn.')
else:
    print('De afstand tussen de beugels mag maximaal 600 mm zijn.')


s = 200
print('De afstand tussen de beugels is', s, 'mm.')


print('')
```

```
a = 45 / 180 * np.pi #De hoek α kan worden gekozen tussen 45° en 90°
pw = Asw / (s * b * np.sin(a))
print('pw =', pw)

pwmin = (0.08 * np.sqrt(fck)) / fyk
print('pwmin =', pwmin)

print('')

if (pwmin < pw) == True:
    print('Er is genoeg dwarskrachtwapening toegepast.')
else:
    print('Er is niet genoeg dwarskrachtwapening toegepast.')
```

```
Asw = 402.1238596594935 mm2
s = 523.5217545769061 mm
sl_max = 354.75 mm

De afstand tussen de beugels mag maximaal 354.75 mm zijn.
De afstand tussen de beugels is 200 mm.

pw = 0.002843445080421354
pwmin = 0.0008763560920082658

Er is genoeg dwarskrachtwapening toegepast.
```

In [14]:

```
#CONTROLE DWARSKRACHT MET WAPENING

acw = 1
v = 0.6 * (1 - fck / 250)
v1 = v
VRdmax = acw * b * z * v1 * fcd / (1 / np.tan(θ) + np.tan(θ))
print('VRdmax =', VRdmax, 'N')

if (VEd <= VRdmax) == True:
    print('De dwarskracht kan opgenomen worden.')
else:
    print('De dwarskracht kan niet opgenomen worden.')
print('')

VRds = Asw * z * fyd / (np.tan(θ) * s)
print('VRds =', VRds, 'N')

if (VEd <= VRds) == True:
```

```
    print('De dwarskracht kan opgenomen worden.')
else:
    print('De dwarskracht kan niet opgenomen worden.')

print('')

if VRdmax < VRds:
    VRd = VRdmax

else:
    VRd = VRds

UC = VEd / VRd
print('UC =', UC)
```

```
VRdmax = 1537650.1181471976 N
De dwarskracht kan opgenomen worden.

VRds = 922968.8533190853 N
De dwarskracht kan opgenomen worden.

UC = 0.3820280594865323
```

In [15]:

```
#SCHEURBEHEERSING
```

In [16]:

```
#OPTREDEND BUIGEND MOMENT

MEd = 513.1 * 10e5
print('MEd =', MEd, 'Nmm')
```

```
MEd = 513100000.0 Nmm
```

In [17]:

```
#SCHEURWIJDTE

srmax = 1.3 * (h - xu)
sigma_s = MEd / (As_nieuw * z)
print('sigma_s =', sigma_s)

kt = 0.6
```

```
fcteff = fctm

Es = 210000
Ecm = 33000
ae = Es / Ecm

if 2.5 * (h - d) < (h - xu) / 3:
    hceff = 2.5 * (h - d)
if 2.5 * (h - d) < h / 2:
    hceff = 2.5 * (h - d)
if (h - xu) / 3 < 2.5 * (h - d):
    hceff = (h - xu) / 3
if (h - xu) / 3 < h / 2:
    hceff = (h - xu) / 3
if h / 2 < 2.5 * (h - d):
    hceff = h / 2
if h / 2 < (h - xu) / 3:
    hceff = h / 2

Aceff = hceff * b
ppeff = As_nieuw / Aceff
delta_epsilon = (sigma_s - kt * fcteff * (1 + ae * ppeff) / ppeff) / Es

if delta_epsilon >= 0.6 * sigma_s / Es:
    delta_epsilon = delta_epsilon
else:
    delta_epsilon = 0.6 * sigma_s / Es

print('')

wk = srmax * delta_epsilon
print('wk =', wk, 'mm')

k = c / cnom
wmax = 0.3 * k
print('wmax =', wmax, 'mm')

print('')

if wk <= wmax:
    print('De scheurwijdte is klein genoeg.')
```

```
else:
    print('De scheurwijdte is te groot.')
```

```
sigma_s = 151.0769240997873

wk = 0.2850860341855841 mm
wmax = 0.44999999999999996 mm

De scheurwijdte is klein genoeg.
```

In [18]:

```
#DOORBUIGING


uz = 12.9
print('uz =', uz, 'mm')


uzmax = 0.004 * L
print('uzmax =', uzmax, 'mm')


print('')


if uz <= uzmax:
    print('De zakking is klein genoeg.')
else:
    print('De zakking is te groot.')
```

```
uz = 12.9 mm
uzmax = 43.2 mm

De zakking is klein genoeg.
```

BIJLAGE 6

Holle doorsnede

Overspanning 10.8 meter

In [1]:

```
import matplotlib.pyplot as plt
%matplotlib inline
import numpy as np
```

In [2]:

```
#REKENWAARDEN BETON EN STAAL

acc = 1
fck = 30
yc = 1.5
fcd = acc * fck /yc
print('fcd =',fcd, 'MPa')

act = 1
fctk005 = 2
fctd = act * fctk005 /yc
print('fctd =',fctd, 'MPa')

fyk = 500
ys = 1.15
fyd = fyk / ys
print('fyd =',fyd, 'MPa')
```

```
fcd = 20.0 MPa
fctd = 1.3333333333333333 MPa
fyd = 434.7826086956522 MPa
```

In [3]:

```
#MINIMALE DEKKING

cmin = 30
cnom = cmin
c = 45

print('c =', c, 'mm')
```

```
c = 45 mm
```

In [4]:

```
#EERSTE SCHATTINGEN VAN DE DOORSNEDE

h_uit = 550
h_in = 275
b_uit = 1000
b_in = 725
L = 10.8 * 10e2

h = h_uit
b = b_uit

o_beugel = 16
o_wapening = 32

print('h_uit =', h_uit, 'mm')
print('h_in =', h_in, 'mm')
print('b_uit =', b_uit, 'mm')
print('b_in =', b_in, 'mm')

print('')

print('obeugel =', o_beugel, 'mm')
print('owapening =', o_wapening, 'mm')
```

```
h_uit = 550 mm
h_in = 275 mm
b_uit = 1000 mm
b_in = 725 mm

obeugel = 16 mm
owapening = 32 mm
```

In [5]:

```
#BUIGING
```

In [6]:

```
#MAATGEVEND BUIGEND MOMENT
```

```
MEd = 716.0 * 10e5
print('MEd =', MEd, 'Nmm')
```

```
MEd = 716000000.0 Nmm
```

In [7]:

```
#MINIMUMOPPERVLAKTE VAN BETONSTAAL

fctm = 2.9
W = 1/6 * b_uit * h_uit**2 - 1/6 * b_in * h_in**2
Mrep = W * fctm
print('W =', W, 'mm3')
print('Mrep =', Mrep, 'Nmm')

print('')

d = h - c - o_beugel - 1/2 * o_wapening
z = 0.9 * d
print('d =', d, 'mm')
print('z_schatting =', z, 'mm')

print('')

Asmin = Mrep / (z * fyd)
print('Asmin =', Asmin, 'mm2')
```

```
W = 41278645.83333333 mm3
Mrep = 119708072.91666664 Nmm

d = 473.0 mm
z_schatting = 425.7 mm

Asmin = 646.7666612833763 mm2
```

In [8]:

```
#CONTROLE OP DIMENSIONERING BALK

Ns = MEd / z
Nc = Ns
As = Ns / fyd

alfa = 0.75
```

```
xu = Nc / (alfa * b * fcd)
print('xu_schatting =', xu, 'mm')

xumax = 0.448 * d
print('xumax =', xumax, 'mm')

print('')

if xu <= xumax:
    print('Drukwapening hoeft niet toegepast te worden.')
else:
    print('Drukwapening moet toegepast worden.')
```

```
xu_schatting = 112.12904236160051 mm
xumax = 211.904 mm

Drukwapening hoeft niet toegepast te worden.
```

In [9]:

```
#BEREKENING VEREISTE HOEVEELHEID BUIGWAPENING

beta = 0.389
formule_a = -(alfa * fcd * b * beta)
formule_b = alfa * fcd * b * d
formule_c = -(MEd)
D = formule_b**2 - 4 * formule_a * formule_c
xu1 = ( -formule_b + np.sqrt(D)) / (2 * formule_a)
xu2 = ( -formule_b - np.sqrt(D)) / (2 * formule_a)

xu = xu1
print('xu_exact =', xu, 'mm')

z = d - beta * xu
print('z_exact =', z, 'mm')

Nc = alfa * fcd * b * xu
Ns = Nc
As = Ns / fyd

print('')

As_1staaf = 1/4 * np.pi * o_wapening**2
```

```
n = As / As_1staaf
print('Onafgerond aantal staven is', n)

As_nieuw = n * 1/4 * np.pi * o_wapening**2
print('De vereiste hoeveelheid wapening ivm buiging As =', As_nieuw, 'mm2')
print(5, 'staven', o_wapening)

n = 5
As_nieuw = n * 1/4 * np.pi * o_wapening**2
p = As_nieuw / (138*1000 + 275*138*2 + 60*1000)
print('p =', p)

print('')

#De bovenste hoeveelheid wapening moest groter worden ivm scheurbeheersing
n = 8
As_nieuw = n * 1/4 * np.pi * o_wapening**2
print('De vereiste hoeveelheid wapening ivm scheurbeheersing As =', As_nieuw, 'mm2'
)
print(n, 'staven', o_wapening)

Ac = h_uit * b_uit - h_in * b_in
p = As_nieuw / (138*1000 + 275*138*2 + 60*1000)
print('p =', p)
print('De afstand tussen de staven is', (b - 2 * (c + o_beugel)- n * o_wapening) /
(n - 1), 'mm')

print('')

if (Asmin < As_nieuw) == False:
        print('Er is te weinig wapening toegepast.')
else:
    print('Er is genoeg wapening toegepast.')

if o_wapening <= 32:
    print('De wapeningsstaven zijn niet te groot.')
else:
    print('De wapeningsstaven zijn te groot.')

if ((b - 2 * (c + o_beugel) - n * o_wapening) / (n - 1)) > 36.5:
    print('De afstanden tussen wapeningsstaven zijn groot genoeg.')
else:
```

```
    print('De afstanden tussen wapeningsstaven zijn te klein.')


print('')


MRd = As_nieuw * fyd * z

print('MRd =', MRd, 'Nmm')


UC = MEd / MRd

print('Unity Check =', UC)
```

```
xu_exact = 111.06001348628175 mm
z_exact = 429.7976547538364 mm

Onafgerond aantal staven is 4.764167026200807
De vereiste hoeveelheid wapening ivm buiging As = 3831.57046527672 mm2
5 staven 32
p = 0.014681411451606188

De vereiste hoeveelheid wapening ivm scheurbeheersing As = 6433.981754551896 mm2
8 staven 32
p = 0.0234902583225699
De afstand tussen de staven is 88.85714285714286 mm

Er is genoeg wapening toegepast.
De wapeningsstaven zijn niet te groot.
De afstanden tussen wapeningsstaven zijn groot genoeg.

MRd = 1202308812.5371213 Nmm
Unity Check = 0.5955208782751008
```

In [10]:

```
#DWARSKRACHT
```

In [11]:

```
#MAATGEVENDE DWARSKRACHT


VEd = 310.9 * 10e2

print('VEd =', VEd, 'N')
```

```
VEd = 310900.0 N
```

In [12]:

```
#CONTROLE DWARSKRACHT ZONDER WAPENING


k = 1 + np.sqrt(200 / d)

if k > 2:

        k = 2
```

```
vmin = 0.035 * k**(3/2) * fck**(1/2)


k1 = 0.15
sigma_cp = 0
VRdc = (vmin + k1 * sigma_cp) * (275*138*2)
print('VRdc_ondergrens =', VRdc, 'N')


CRdc = 0.12
VRdc = (CRdc * k * (100 * p * fck )**(1/3) + k1 * sigma_cp) * (275*138*2)
print('VRdc =', VRdc, 'N')


print('')


if (VEd < VRdc) == False:
        print('De dwarskrachtwapening is nodig.')
else:
    print('De dwarskrachtwapening is niet nodig.')
```

```
VRdc_ondergrens = 30845.90120684789 N
VRdc = 62083.6699661673 N

De dwarskrachtwapening is nodig.
```

In [13]:

```
#BEREKENING DWARSKRACHTWAPENING


Asw = 2 * 1/4 * np.pi * o_beugel**2
print('Asw =', Asw, 'mm2')


θ = 21.8 / 180 * np.pi
s = Asw * z * fyd / (np.tan(θ) * VEd) #De hoek θ kan worden gekozen tussen 21.8° en
 45° (cotθ = 2.5 resp. 1.0)
print('s =', s, 'mm')


st = 0.75 * d
print('st_max =', st, 'mm')


print('')


if s > st:
    s = st


if s < 600:
```

```
    print('De afstand tussen de beugels mag maximaal', s, 'mm zijn.')
else:
    print('De afstand tussen de beugels mag maximaal 600 mm zijn.')

s = 225
print('De afstand tussen de beugels is', s, 'mm.')

print('')

a = 45 / 180 * np.pi #De hoek α kan worden gekozen tussen 45° en 90°
pw = Asw / (s * b * np.sin(a))
print('pw =', pw)

pwmin = (0.08 * np.sqrt(fck)) / fyk
print('pwmin =', pwmin)

print('')

if (pwmin < pw) == True:
    print('Er is genoeg dwarskrachtwapening toegepast.')
else:
    print('Er is niet genoeg dwarskrachtwapening toegepast.')
```

```
Asw = 402.1238596594935 mm2
s = 604.2912668575547 mm
st_max = 354.75 mm

De afstand tussen de beugels mag maximaal 354.75 mm zijn.
De afstand tussen de beugels is 225 mm.

pw = 0.0025275067381523146
pwmin = 0.0008763560920082658

Er is genoeg dwarskrachtwapening toegepast.
```

In [14]:

```
#CONTROLE DWARSKRACHT MET WAPENING


acw = 1
v = 0.6 * (1 - fck / 250)
v1 = v
VRdmax = acw * b * z * v1 * fcd / (1 / np.tan(θ) + np.tan(θ))
print('VRdmax =', VRdmax, 'N')


if (VEd <= VRdmax) == True:
```

```
    print('De dwarskracht kan opgenomen worden.')
else:
    print('De dwarskracht kan niet opgenomen worden.')
print('')

VRds = Asw * z * fyd / (np.tan(θ) * s)
print('VRds =', VRds, 'N')

if (VEd <= VRds) == True:
    print('De dwarskracht kan opgenomen worden.')
else:
    print('De dwarskracht kan niet opgenomen worden.')
```

```
VRdmax = 1564975.4343696083 N
De dwarskracht kan opgenomen worden.

VRds = 834996.2438489499 N
De dwarskracht kan opgenomen worden.
```

In [15]:

```
#SCHEURBEHEERSING
```

In [16]:

```
#OPTREDEND BUIGEND MOMENT

MEd = 423.2 * 10e5
print('MEd =', MEd, 'Nmm')
```

```
MEd = 423200000.0 Nmm
```

In [17]:

```
#SCHEURWIJDTE

srmax = 1.3 * (h - xu)
sigma_s = MEd / (As_nieuw * z)
print('sigma_s =', sigma_s)

kt = 0.6
fcteff = fctm

Es = 210000
```

```
Ecm = 33000
ae = Es / Ecm

if 2.5 * (h - d) < (h - xu) / 3:
    hceff = 2.5 * (h - d)
if 2.5 * (h - d) < h / 2:
    hceff = 2.5 * (h - d)
if (h - xu) / 3 < 2.5 * (h - d):
    hceff = (h - xu) / 3
if (h - xu) / 3 < h / 2:
    hceff = (h - xu) / 3
if h / 2 < 2.5 * (h - d):
    hceff = h / 2
if h / 2 < (h - xu) / 3:
    hceff = h / 2

print('hceff =', hceff, 'mm')
Aceff = hceff * b
ppeff = As_nieuw / Aceff
delta_epsilon = (sigma_s - kt * fcteff * (1 + ae * ppeff) / ppeff) / Es

if delta_epsilon >= 0.6 * sigma_s / Es:
    delta_epsilon = delta_epsilon
else:
    delta_epsilon = 0.6 * sigma_s / Es

print('')

wk = srmax * delta_epsilon
print('wk =', wk, 'mm')

k = c / cnom
wmax = 0.3 * k
print('wmax =', wmax, 'mm')

print('')

if wk <= wmax:
    print('De scheurwijdte is klein genoeg.')
else:
    print('De scheurwijdte is te groot.')
```

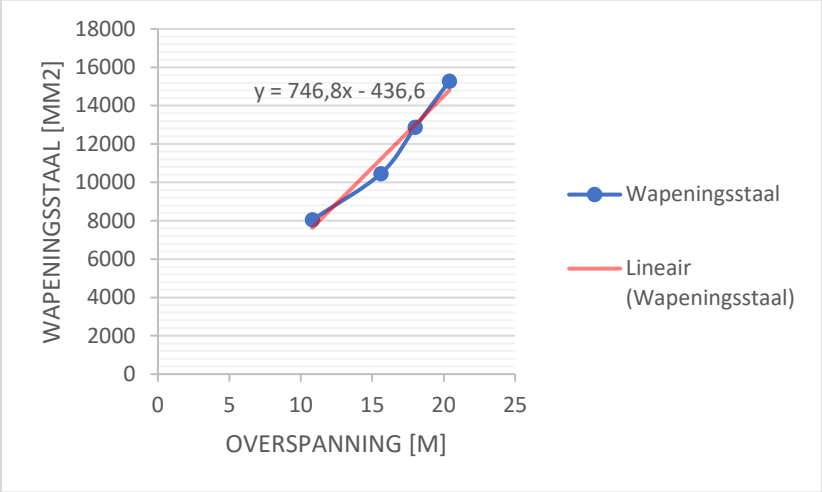
```
sigma_s = 153.03888491985833
hceff = 146.31332883790608 mm

wk = 0.27823886005134035 mm
wmax = 0.44999999999999996 mm

De scheurwijdte is klein genoeg.
```

In [18]:

```
#DOORBUIGING


uz = 11.7

print('uz =', uz, 'mm')


uzmax = 0.004 * L

print('uzmax =', uzmax, 'mm')


print('')


if uz <= uzmax:

    print('De zakking is klein genoeg.')

else:

    print('De zakking is te groot.')
```

```
uz = 11.7 mm
uzmax = 43.2 mm

De zakking is klein genoeg.
```

BIJLAGE 6



Figuur 9.9 – Hoeveelheid wapeningsstaal voor een massieve doorsnede per overspanning