



TECHNISCHE UNIVERSITEIT DELFT

EINDRAPPORT BACHELOR EINDWERK

Een studie naar de maximale kromming van een kokerligger

Auteur:
J.W. BORGHANS

Begeleiders:
S.A.A.M. FENNIS
P.C.J. HOOGENBOOM

25 oktober 2013

VOORWOORD

Voor u ligt het eindrapport van het onderzoek naar een voorgespannen gekromde kokerligger. Dit onderzoek is uitgevoerd als eindwerk van de bachelor fase van Civiele Techniek aan de Technische Universiteit Delft. Het onderzoek heeft in de eerste periode van het studiejaar 2013/2014 plaatsgevonden en heeft ongeveer 8 weken geduurd.

In dit project is samen met Yorick Ligthart in de eerste drie weken een ontwerp gemaakt voor een rechte kokerligger. Nadien zijn we ieder onze eigen weg gegaan en hebben een specifieke kant van het krommen van de ligger bekeken. De focus van dit rapport ligt op de bepaling van de minimale benodigde straal bij een bepaalde constructiedoorsnede. Daarbij is onder andere gekeken naar het uittrekgedrag van de voorspankabels door de kromming van de ligger en de maximale kromming uit de voorspankabels.

Graag wil ik mevrouw S.A.A.M.Fennis en meneer P.C.J.Hoogenboom bedanken voor hun begeleiding tijdens dit onderzoek. Ik wens de lezer veel plezier toe tijdens het lezen van dit rapport.

Delft oktober 2013

Jaap Borghans

SAMENVATTING

Voor dit bachelor eindwerk is er onderzoek gedaan naar de maximale kromming van een kokerligger. Allereerst is er een ontwerp gemaakt van een viaduct met een enkele rijstrook en een redresseerstrook welke gedimensioneerd zijn op een afrit met een kromtestraal van 70 meter. De ligger bestaat uit een kokerligger met flenzen met een totale breedte van 6 meter. De overspanning van het viaduct bedraagt 50 meter. Aan de hand van deze randcondities zijn de dimensies van de kokerligger vastgesteld, met uitzondering van de lijfbreedte van de kokerligger.

Nadat deze dimensies zijn vastgelegd, is stap voor stap in theorie uitgewerkt hoe de minimale kromtestraal bepaald wordt. Eerst is voor een rechte ligger de benodigde voorspanning en het aantal voorspankabels bepaald. Daarna is er gerekend met gekromde liggers.

Naar voren gekomen is, dat bij het gebruik van voorspankabels die in het horizontale vlak een kromming meekrijgen, deze een diagonale resultante krommingsdrukspanning opleveren in de constructie. Om met deze krommingsdruk te kunnen rekenen is de schuine kracht opgedeeld in een horizontale en een verticale vector.

Vanuit het model voor afschuiving is een formule geformuleerd waarbij aan de hand van de betondeklaag, die zich voor de kabel bevindt, de minimale straal bepaald kan worden. Daarbij is gebleken dat voor redelijk kleine krommingen de kabels niet uit zullen spatten.

Het blijkt dat de verhouding tussen de werkelijke diagonale kracht en de benodigde verticale kracht van veel groter belang is voor de maximale kromming. De verhouding tussen de excentriciteit van de ligger en de pijl van de voorspanning blijkt een directe invloed op de krachtenverdeling in de voorspankabel te hebben.

Aan de hand van een parameterstudie is vanuit de variabele lijfbreedte de minimale boogstraal bepaald. Dit geeft een grafiek met op de x-as de breedte van de verticale balk en op de y-as de minimale boogstraal. Met behulp van deze grafiek is het mogelijk om met een beoogde boogstraal de lijfbreedte te bepalen.

Aan de hand van deze parameterstudie is geconcludeerd dat het sterk krommen van een kokerligger met een lengte van 50 meter te kostbaar is. Het ontwerp dat in dit onderzoek gepresenteerd is voldoet pas indien de overspanning teruggebracht wordt naar minimaal 40 meter.

INHOUDSOPGAVE

1	INLEIDING	7
1.1	Probleemstelling	7
1.2	Doelstelling	7
1.3	Projectomschrijving	8
2	ONTWERP KOKERLIGGER	9
2.1	Geometrisch wegontwerp	9
2.2	Lengte overspanning	10
2.3	Materialen	10
2.3.1	Betonsoort	10
2.3.2	Wapeningsstaal	11
2.3.3	Voorspansysteem	11
2.4	Belastingen	12
2.4.1	Asfaltlaag	12
2.4.2	Eigen gewicht	13
2.4.3	Verkeersbelasting	13
2.4.4	Belastingcombinaties	15
2.5	Constructief ontwerp	16
2.5.1	Schatting totale hoogte	17
2.5.2	Breedte onderflens	18
2.5.3	Hoogte bovenflens	21
2.5.4	Hoogte onderflens	21
2.6	Voorspanning	23
2.6.1	Theoretische bepaling	23
2.6.2	Voorbeeldberekening	28
2.6.3	Totale hoogte constructie	32
2.6.4	Keuze voorspansysteem	33
2.7	Tussentijdse conclusies	35
3	KROMMING	37
3.1	Booglengte en de excentriciteit	37
3.2	Krachtenverhouding voorspankabels	39
3.2.1	Excentriciteit voorspankabel	41
3.3	Plaatsing en aantal voorspankabels	43
3.4	Minimale boogstraal uit maximaal voorspanoppervlak	44
3.4.1	Controle werkelijke voorspankracht	45
3.4.2	Maximale betondrukspanning	46
3.5	Minimale boogstraal uit dikte betondekking	47
3.5.1	Horizontale spanning voorspankabel	47
3.5.2	Uittrekcapaciteit betonlaag	48
3.5.3	Bepaling minimale straal	50
3.6	Voorbeeldberekening	50
3.6.1	Beginwaarden	51

3.6.2	3 Kabels boven elkaar	52
3.6.3	4 Kabels boven elkaar	54
3.7	Tussentijdse conclusies	54
4	PARAMETERSTUDIE	57
4.1	Boogstraal	57
4.2	Aantal buizen naast elkaar	58
4.3	Aantal buizen boven elkaar	59
4.4	Overspanning	63
4.5	Buisdiameter	67
4.6	Totale hoogte	68
5	CONCLUSIES & AANBEVELINGEN	71
5.1	Conclusies	71
5.2	Aanbevelingen	72
	Bibliografie	75
	Lijst van figuren	77
	Lijst van tabellen	79
	Symbolenlijst	81
A	BIJLAGE A: WERKPLAN	83
A.1	Hoofdlijnen	83
A.2	Per week	83
B	BIJLAGE B: BEPALINGEN CONSTRUCTIEF ONTWERP	85
B.1	Voorbeeldberekening standaard waarden	85
B.1.1	Oppervlakte	86
B.1.2	Normaalkrachtencentrum	86
B.1.3	Traagheidsmoment	87
B.1.4	Weerstandsmoment	88
B.2	Breedte bovenste balk	88
C	BIJLAGE C: KEUZE VOORSPANSYSTEEM	95
C.1	Voorspankabels bij 450 mm lijfbreedte	96
C.2	Voorspankabels bij 500 mm lijfbreedte	100
D	BIJLAGE D: PLAATSING EN AANTAL VOORSPANKABELS	103
D.1	Horizontale verdeling	103
D.2	Verticale verdeling	105
E	BIJLAGE E: AFLEIDINGEN	109
E.1	Minimale straal uit betondikte	109
F	BIJLAGE F: EVALUATIE	111

INLEIDING

In een dichtbevolkt land als Nederland is infrastructuur één van de belangrijkste facetten van het dagelijkse leven. De infrastructuur bestaat tegenwoordig voor een aanzienlijk deel uit bruggen en viaducten. Doordat er steeds meer auto's bij komen en het woonwerkverkeer blijft groeien, is er behoefte om de infrastructuur aan te passen. Er is echter, doordat Nederland zo'n dichtbevolkt land is, gebrek aan ruimte. Daar waar vroeger een kruising of een rotonde de voorrang kreeg, gaat men nu de hoogte in om de beperkte ruimte te benutten.

Om grote overspanningen te overbruggen, wordt er vaak gebruik gemaakt van voorgespannen liggers voor bijvoorbeeld een fly-over. Nu er vanwege de kleinere ruimte scherpere bochten dienen te worden gemaakt, zullen de toegepaste voorgespannen liggers ook een kromming moeten krijgen. Deze extremere kromming brengt nogal wat uitdagingen met zich mee, zoals bijvoorbeeld een groot torsiemoment en het risico op uitspatten van de voorspankabels.

1.1 PROBLEEMSTELLING

Wanneer er krachten op een element van een kokerligger werken, ontstaan er momenten. Zodra er gekromde elementen aan te pas komen, is het zo dat de belastingen ook voor torsiemomenten zullen zorgen. Door de kromming van het element ontstaat er een excentriciteit van de belasting en een hele andere krachtwerking in de ligger.

Bij het toepassen van sterk gekromde viaducten of bruggen met behulp van voorspanning, is daarnaast het probleem dat de voorspankabels naast een verticaal voorziene spanning ook een horizontale spanning toevoegen. Deze horizontale spanning zorgt voor eventueel uittrekken van de voorspankabels. Het probleem is dat voor het zijdelings uitspatten en de minimale betondikte nog geen ontwerp-richtlijnen beschikbaar zijn.

1.2 DOELSTELLING

Dit onderzoek heeft meerdere doelen welke verschillend zijn uitgewerkt door respectievelijk Yorick Ligthart en Jaap Borghans. Het

eerste doel is om een compleet uitgewerkt model te verkrijgen van een gekromde voorgespannen vierkante kokerligger met behulp van het programma SCIA Engineer. Met behulp van dit model kan er gekeken worden naar de abnormale krachtenwerking van bijvoorbeeld het extra torsiemoment dat ontstaat bij een gekromd voorgespannen element.

Het tweede doel is om ontwerpvoorwaarden te bepalen voor de minimale betondikte van de gekromde vierkante kokerligger bij verschillende kromtestralen, om het horizontaal uitspatten van de voorspankabel te voorkomen. Dit kan leiden tot een minimaal benodigde kromtestraal van het element, minimale diktes van beton bij verschillende kromtestralen en eventuele ontwerpgrafieken.

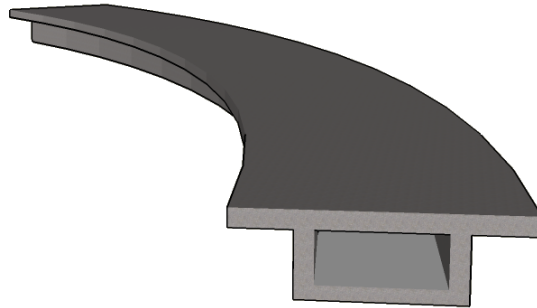
1.3 PROJECTOMSCHRIJVING

Bij de start van dit onderzoek is er door middel van handberekeningen een ontwerp gemaakt voor een rechte voorgespannen kokerligger die toegepast wordt bij fly-overs. Naast de handberekening van het rechte element is er ook een model gemaakt van het ontwerp met behulp van het programma SCIA Engineer. De resultaten van de handberekening en het model zijn in het rapport van Yorick Lightart vergeleken. Deze eerste berekening en het model zullen als uitgangssituatie en vergelijkingsmateriaal dienen voor de daaropvolgende modelleringen en ontwerpen van de gekromde variant. Het SCIA modeleergedeelte en onderzoek naar torsie is terug te vinden in het verslag van Yorick Ligthart.

Zodra het rechte ontwerp af was, is begonnen met het ontwerp van een gekromde voorgespannen kokerligger. Daarbij is met dezelfde randcondities en belastingen gerekend als de rechte variant. Met betrekking tot de voorspanning is bepaald hoe de krachten vanuit de kabel zich uiteten in 3-dimensionale richting. Dit is van belang voor de bepaling van het latere ponsgedrag in horizontale richting. Voor verschillende lijfbreedtes is daarna de minimale boogstraal bepaald. Aan de hand van een geprogrammeerd excel bestand zijn daarna grafieken ontworpen welke een uitdrukking geven voor de de minimale straal uit de lijfbreedte. Tevens is er met hulp van het excel model nog een parameterstudie uitgevoerd om te vergelijken wat de verschillende parameters voor invloed hebben op de minimale boogstraal.

ONTWERP KOKERLIGGER

Bij de start van dit onderzoek wordt een ontwerp gemaakt voor de kokerligger. Er wordt een kokerligger ontworpen met aan de bovenzijde twee uitstekende flensen. Een indicatie van het ontwerp is te vinden in figuur 1. In dit hoofdstuk wordt in eerste instantie een rechte kokerligger gedimensioneerd. Pas in hoofdstuk drie wordt er gekeken naar de kromming van de ligger.



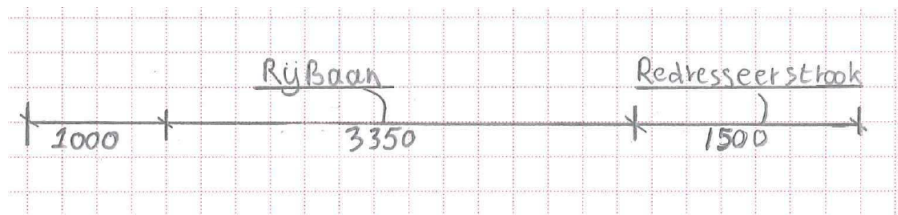
Figuur 1: Gekromde kokerligger

In dit hoofdstukken worden eerst het geometrisch wegontwerp en de lengte van de overspanning vastgelegd. Dan worden de materialen die zullen worden gebruikt benoemd, waarna de verschillende belastingen en belastingcombinaties worden bepaald. Vanuit de materialen en belastingen worden de dimensies van het constructief ontwerp bepaald. Als laatste wordt er ingegaan op het voorspannen van de rechte ligger. Het doel van dit hoofdstuk is om een rechte ligger te ontwerpen waarbij alleen de breedte van de lijven nog variabel is.

2.1 GEOMETRISCH WEGONTWERP

Om tot een constructief ontwerp te komen wordt eerst het geometrisch wegontwerp vastgelegd. Bij het geometrisch wegontwerp wordt er gekeken naar de precieze indeling van de weg. In dit onderzoek ligt de focus op de bepaling van minimale kromtestralen voor gekromde kokerliggers. Omdat de focus ligt op deze kleine kromtestralen wordt er gekeken naar een afrit van een snelweg waarbij er

een flinke kromming toegepast moet worden vanwege het ruimtegebrek op de locatie. Daarbij gaat het om een eenbaans weg waar een maximum snelheid geldt van 50 km/u.



Figuur 2: Rijbaanindeling (in mm)

Voor de weg geldt een wegsoort categorie VI [1], wat neerkomt op een ontwerpsnelheid van 50 km/u. Voor categorie VI geldt een rijstrookbreedte van 2,75 m. Volgens de RONA [1] geldt bij een minimale boogstraal van 70 m dat er een bochtverbreding moet worden toegepast van 0,60 m. De rijstrookbreedte is dan $(2,75 + 0,60 =) 3,35$ meter. Aan de binnenzijde van de rijstrook ligt een vlucht/redresseerstrook van 1,5 m en aan de buitenzijde moet minimaal 1 meter objectafstand aanwezig zijn. Uiteindelijk komt dit neer op een totale breedte van de weg van $1 + 2,75 + 0,60 + 1,5 = 5,85$ meter. De indeling van de weg is gepresenteerd in figuur 2. Omdat er ook nog een eventuele reling wordt geplaatst, wordt er bij dit ontwerp uitgegaan van een breedte van 6 meter voor de constructie.

2.2 LENGTE OVERSPANNING

Vanwege het vormvaste ontwerp van een kokerligger met zijflensen, wordt dit ontwerp vaak pas toegepast wanneer er een flinke overbrugging gemaakt wordt. Daarom zal er bij dit ontwerp worden uitgegaan van een overspanning van de kokerligger van 50 meter hart op hart tussen de opleggingen.

2.3 MATERIALEN

In dit gedeelte worden de verschillende materialen voor de uitgangssituatie van dit onderzoek worden besproken.

2.3.1 Betonsoort

Omdat de ligger een flinke overspanning maakt en wordt voorgespannen, wordt er gebruik gemaakt van de sterke betonklasse C55/67. De waarden die bij deze betonsterkteklasse horen staan in onderstaande

tabel 1. Omdat de constructie in de buitenlucht geplaatst wordt en afwisselend nat en droog is, wordt er uitgegaan van een milieuklasse XC4. Dit komt neer op een maximale scheurwijdte van 0,3 mm (NEN EN 1991-1-1 Eurocode 2)

Omschrijving	afkorting	waarde	eenheid
Karakteristieke betondruksterkte	f_{ck}	55	N/mm^2
Karakteristieke kubusdruksterkte	$f_{ck,cube}$	67	N/mm^2
Gemiddelde cilinderdruksterkte	f_{cm}	63	N/mm^2
Gemiddelde betontreksterkte	f_{ctm}	4,2	N/mm^2
Gemiddelde elasticiteitsmodulus	E_{cm}	38000	N/mm^2
Vloeigrens	ϵ_{c3}	1,8	%
Uiterste betonrek	ϵ_{cu3}	3,1	%

Tabel 1: Waarden betonsterkteklasse C55/67

2.3.2 Wapeningsstaal

Voor de algemene langswapening en dwarskrachtwapening wordt staalsoort B500B gebruikt. De karakteristieke waarden voor deze staalsoort staan in tabel 2

Omschrijving	afkorting	waarde	eenheid
Karakteristieke vloeigrens	f_{yk}	500	N/mm^2
Ontwerpwaarde treksterkte	f_{yd}	435	N/mm^2
Elasticiteitsmodulus	E_s	200000	N/mm^2

Tabel 2: Waarden staalsoort B500B

2.3.3 Voorspansysteem

Bij de voorspanning wordt gebruik gemaakt van nagespannen strengen omdat het onmogelijk is om een gekromde ligger met een grote lengte al vooraf gespannen aan te leveren. Het strengen systeem wordt gebruikt omdat daarbij makkelijk minder of meer voorspan oppervlakte kan worden toegevoegd.

Als voorspansysteem is het Dywidag 'ASTM A 416'[2] systeem gekozen met strengen van een diameter van 15 mm. De specifieke waarden van het systeem zijn te zien in figuur 3.

► Technical Data			
code/specification type		ASTM A 416	
		0.5" (13 mm)	0.6" (15 mm)
yield strength $f_y^{1)}$	(N/mm ²)	1,670	1,670
ultimate strength f_u	(N/mm ²)	1,860	1,860
nom. diameter	(mm)	12.7	15.24
cross-sectional area	(mm ²)	98.71	140
weight	(kg/m)	0.775	1.102
ultimate load	(kN)	183.7	260.7
modulus of elasticity	(N/mm ²)	195,000	195,000
relaxation after ²⁾ 1,000 h at 0.7 x 9013	(%)	2.5	2.5

Figuur 3: Specificaties voorspankabel [2]

Dit voorspansysteem wordt beschermd en aangelegd in bijpassende gegolfde metalen buizen. De specificaties van de buis zijn te zien in figuur 4. Daarbij staat I.D. voor 'Inner Diameter' oftewel binnenste diameter en O.D. voor 'Outer Diameter' ofwel buitenste diameter.

Dimensions of Corrugated Metal Duct (Standard Sizes)			
tendon type 0.5"	tendon type 0.6"	sheathing	
		I.D. in/mm	O.D. in/mm
5907	6805	2/50	2.15/54.6
5909	6807	2.375/60	2.6/66
5912	6809	3.12/80	3.31/84
5915	6812	3.52/90	3.7/94
5920	6815	3.63/93	3.82/97
5927	6819	4/100	4.19/106.3
5937	6827	4.6/117	4.78/121.4
	6837	5.26/134	5.45/138.4

Figuur 4: Specificaties voorspankoker [2]

De exacte bepaling van het gebruik van het voorspansysteem gebeurt in paragraaf 2.6 over voorspanning.

2.4 BELASTINGEN

2.4.1 Asfaltlaag

Volgens het dictaat "Wegen en spoorwegen"[3] is de asfaltlaag die benodigd is gemiddeld 260 mm dik. Deze 260 mm dikke laag bestaat uit een aantal verschillende soorten asfalt welke van onder naar boven toe steeds opener worden. Bij deze constructie wordt er voor het gemak van uitgegaan dat er voor de totale laag Zeer Open Asfalt Beton (ZOAB) wordt toegepast. Het soortelijk gewicht van ZOAB is 2150 kg/m^3 . Het asfalt komt over een breedte van 6 meter te liggen. De belasting als gevolg van asfalt komt dus neer op $33,54 \text{ kN/m}$ in de lengterichting van de ligger.

2.4.2 *Eigen gewicht*

Het eigen gewicht is een permanente belasting die in de loop van de tijd weinig tot niet in de grootte zal veranderen. Het eigen gewicht van de kokerligger wordt gevormd door het volume van het aanwezige beton te vermenigvuldigen met het soortelijk gewicht van beton.

2.4.3 *Verkeersbelasting*

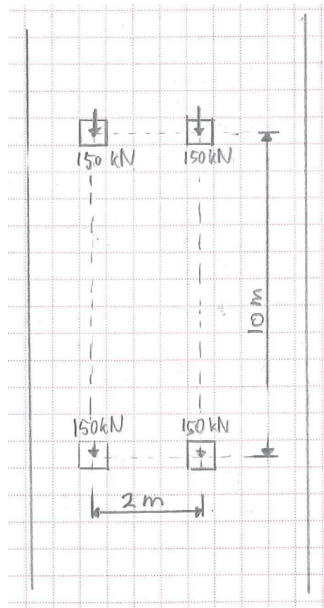
Naast het permanente eigen gewicht is er sprake van een variabele belasting veroorzaakt door het verkeer dat over de weg rijdt. Voor de bepaling van deze belasting is uitgegaan van Belasting geval 1 volgens Eurocode 1: Belastingen op constructies Deel 2: Verkeersbelasting op bruggen (NEN-EN 1991-2+C1:2011) en de nationale bijlage (NEN-EN 1991-2+C1/NB)

Bij belastingmodel 1 zijn er twee deelsystemen van toepassing. De eerste is het tandemstelsel (TS) dat rekent met geconcentreerde dubbele as-lasten. De tweede is de rekening met gelijkmatig verdeelde belastingen (UDL stelsel). Het UDL stelsel levert een gelijkmatig verdeelde belasting en het TS stelsel geeft enkele puntlasten die op de meest ongunstigste positie dienen te worden toegepast.

Tandemstelsel:

Omdat er maar één daadwerkelijke rijstrook van toepassing is, zal er met het tandemstelsel gerekend worden met een dubbele as-last van ieder $Q_{ik} = 300$ kN. Wordt er naar locale belastingen gekeken dan wordt de as-last via twee identieke wielen in rekening gebracht. Het contactoppervlak per wiel is 0,4 bij 0,4 meter en de belasting per wiel is 0,5 Q_{ik} . De standaardvrachtwagen waar mee wordt gerekend, is ongeveer 12 meter lang en heeft gemiddeld een afstand tussen de twee assen van 10 meter. Gemiddeld zitten de wielen 2 meter hart op hart van elkaar. Uiteindelijk komt het er dus op neer dat er 4 puntlasten van ieder 150 kN¹ in een rechthoek van 10 bij 2 meter in de lengterichting van het brugdek staan. Dit is weergegeven in figuur 5

¹ Door een verkeerde interpretatie van het tandemstelsel is bij enkele berekeningen gerekend met een puntlast van 300 kN.

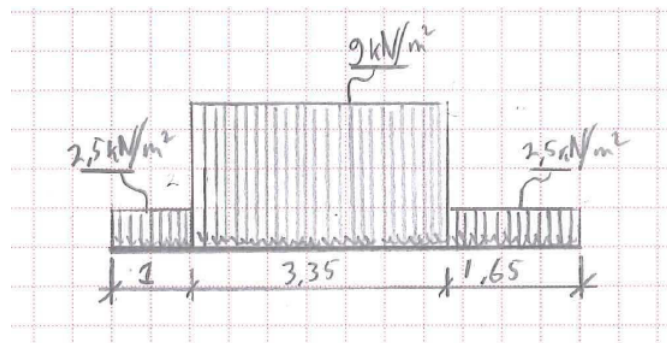


Figuur 5: Plaatsing puntlasten Tandemstelsel

Volgens de eurocode kan er in de lengte richting van de ligger in plaats van een dubbele as-last met een enkele as-last van 600 kN gerekend worden, omdat de overspanning van de brug groter is dan 10 meter. De enkele aslast Q_{ik} is dan dus 600 kN.

UDL Stelsel:

Volgens Eurocode 1 tabel 4.2 heeft de eerste rijstrook een gelijkmatige verdeelde belasting van $q_{ik} = 9 \text{ kN/m}^2$. Bij het resterende oppervlak moet men uit gaan van $q_{ik} = 2,5 \text{ kN/m}^2$. De belastingverdeling over de breedte van de weg is te zien in figuur 6.

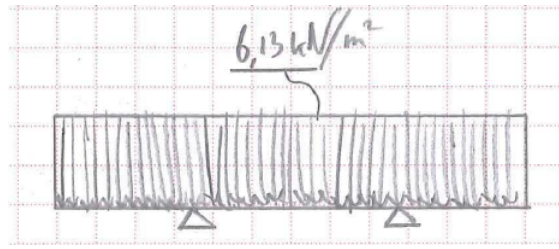


Figuur 6: Verdeelde belasting breedte wegdek

Over een strook van 1 meter komt men gemiddeld uit op:

$$\frac{9 \times 3,35 + 2,5 \times 2,65}{6} = 6,13 \text{ kN/m}^2$$

Dit is weergegeven in figuur 7



Figuur 7: Gemiddelde verdeelde belasting breedte wegdek voor de lengterichting

Dit leidt uiteindelijk tot een gelijkmatig verdeelde belasting in de lengterichting van de kokerligger van 36,78 kN/m.

2.4.4 Belastingcombinaties

Voor de kokerliggerconstructie zijn zeven verschillende belastingcombinaties(BC) mogelijk. De combinaties worden hieronder één voor één opgesomd. Indien niet anders gemeld wordt er in de uiterste grenstoestand (UGT) gerekend met een belastingfactor van 1,2 op permanente belasting en 1,5 op variabele belasting.

- *BC 1: Eigen Gewicht*

De eerste belastingcombinatie bestaat alleen uit het permanente eigen gewicht van de betonconstructie en de asfaltlaag.

- *BC 2: Eigen Gewicht + Verdeelde Variabele Belasting*

De tweede belastingcombinatie bestaat uit het eigen gewicht en de verdeelde variabele verkeersbelasting.

- *BC 3: Eigen Gewicht + Verdeelde Variabele Belasting*

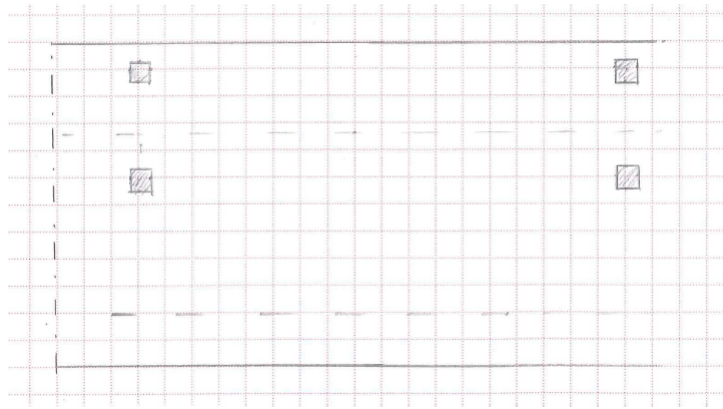
De derde belastingcombinatie is het zelfde als de tweede. Alleen wordt voor de UGT gerekend met de totale belasting (permanente + Variabele) maal een veiligheidsfactor van 1,35.

- *BC 4: Eigen Gewicht + Extreme aslast locatie 1*

De vierde belastingcombinatie bestaat uit het eigen gewicht van de constructie en een extreme as-last gepositioneerd in de lengte- en breedte-richting precies in het midden van de brug.

- *BC 5: Eigen Gewicht + Extreme aslast locatie 2*

De vijfde belastingcombinatie bestaat uit het eigen gewicht van de constructie en een extreme as-last gepositioneerd helemaal aan de zijkant van de weg. In figuur 8 is een bovenaanzicht van de brug te zien met de positionering van deze extreme wiellasten.



Figuur 8: Plaatsing extreme puntlasten locatie 2

- *BC 6: Eigen Gewicht + Verdeelde Variabele Belasting + Extreme aslast locatie 1*

De zesde belastingcombinatie bestaat uit het eigen gewicht van de constructie, een verdeelde variabele verkeersbelasting en een extreme as-last gepositioneerd in de lengte- en breedte-richting precies in het midden van de brug. Omdat het hier een combinatie betreft van de verdeelde belasting en de extreme aslast moet er een combinatiefactor worden toegepast bij een van deze variabele lasten. Het maximum van een van de beide combinaties is maatgevend. Volgens Eurocode 1 is bij het toepassen van het ULD stelsel in combinatie met het TS stelsel (variabel en extreme belasting) de combinatiefactor (ψ_0) = 0,8 van toepassing.

- *BC 7: Eigen Gewicht + Verdeelde Variabele Belasting + Extreme aslast locatie 2*

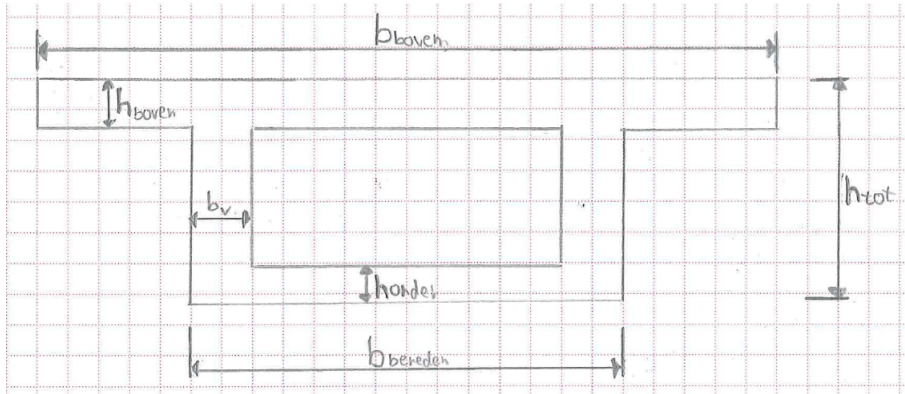
De zevende belastingcombinatie bestaat uit het eigen gewicht van de constructie, een verdeelde variabele verkeersbelasting en een extreme as-last gepositioneerd in het midden van de ligger en helemaal aan de zijkant van de weg. Ook hier gaat het om een combinatie van variabele belastingen dus moet ook hier een combinatie factor worden toegepast.

Voor verschillende situaties gelden ook verschillende maatgevende belastingcombinaties. Per ontwerpsituatie wordt gekeken welke belastingcombinatie maatgevend is. De belastingsituatie voor bepaling van de breedte van de verticale balk is terug te vinden in paragraaf 2.5.2 en de bepalende belastingsituaties voor de voorspanning zijn terug te vinden in paragraaf 2.6.1.1

2.5 CONSTRUCTIEF ONTWERP

In deze paragraaf wordt het ontwerp constructief uitgewerkt. Per sub-paragraaf worden de dimensies van de ligger vastgesteld. In eerste

instantie wordt er een schatting gegeven voor de totale hoogte, om zo een aantal andere dimensies vast te leggen. De hoogte zal definitief worden vastgelegd in de volgende paragraaf over voorspanning. Verder worden in deze paragraaf de breedte van de onderflens en de hoogte van de onder- en bovenflens bepaald. De breedte van de bovenflens is in paragraaf 2.1 al bepaald.



Figuur 9: Dimensie aanduidingen doorsnede

In figuur 9 is de kokerdoorsnede te zien met de dimensie aanduidingen van de doorsnede dimensies. De afkortingen staan voor:

$$b_{boven} = \text{breedte bovenflens}$$

$$b_{beneden} = \text{breedte onderflens}$$

$$b_v = \text{lijfbreedte}$$

$$h_{tot} = \text{totale hoogte}$$

$$h_{boven} = \text{hoogte bovenflens}$$

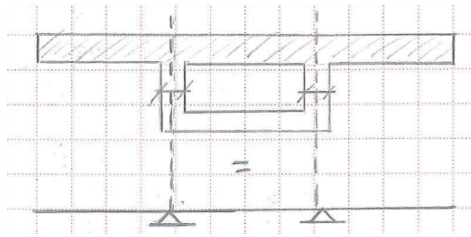
$$h_{onder} = \text{hoogte onderflens}$$

2.5.1 Schatting totale hoogte

Om een eerste schatting van de hoogte van de kokerligger te bepalen wordt de vuistregel gebruikt dat de hoogte ongeveer $1/35$ van de overspanning van de ligger beslaat. Dit komt bij een overspanning van 50 meter neer op 1,43 m. Voor het ontwerp wordt in eerste instantie 1,4 meter aangenomen. Later in dit hoofdstuk wordt deze waarde nog gecontroleerd.

2.5.2 Breedte onderflens

De breedte van het onderste gedeelte van de kokerligger wordt bepaald door de krachtenverdeling in de bovenflens. De twee verticale balken van het lijf kunnen namelijk worden geschematiseerd als twee opleggingen van de bovenflens, waarbij deze bovenflens wordt geschematiseerd als een balk met een breedte van 1 meter. Via de opleggingen ontstaat een bepaalde momentenlijn en deze moet zo gunstig mogelijk uitkomen. Het voorgestelde mechanicaschema is weergegeven in figuur 10.



Figuur 10: Mechanica schematisering bovenste balk

In de schematisering is te zien dat de afstand tussen de opleggingen invloed heeft op de krachtverdeling in de constructie. Het hart van de opleggingen wordt geschematiseerd in het midden van de lijven van de kokerligger. Er wordt een vergelijking gemaakt waarbij verschillende afstanden tussen de opleggingen worden vergeleken.

Om de eerste berekeningen uit te voeren, dient het eigen gewicht bekend te zijn van de bovenflens. De bovenflensbreedte is al bekend uit het geometrisch wegprofiel, maar de hoogte van de bovenflens is dat nog niet. Om het eigen gewicht te bepalen wordt de hoogte van de bovenflens aangenomen op 400 mm. In de volgende paragraaf wordt een controle gedaan of deze aanname klopt.

Om de daadwerkelijke breedte van de onderflens te bepalen worden op verschillende afstanden tussen de opleggingen de momentlijnen en dwarskrachtlijnen vergeleken. Om deze vergelijking te maken worden eerst de belastingcombinaties bepaald.

Zoals in paragraaf 2.4.3 en 2.4.4 met betrekking tot de verkeersbelasting en de belastingcombinaties al is vermeld, is in de UGT een combinatie van een verdeelde belasting en een puntbelasting mogelijk. Om de maatgevende situatie te bepalen wordt er uitgegaan van de twee meest extreme situaties die er kunnen plaatsvinden op de kokerligger. Deze situaties vinden plaats als de puntlasten zover mogelijk op het uiteinde van de flens staan (locatie 1) of als deze precies in het midden van de ligger worden geplaatst (locatie 2). Dit levert twee verschillende situaties op. Beide situaties worden vervolgens onder verschillende belastingcombinaties getest:

$$\text{Combinatie A} = 1,2 \times E_g + 1,5 \times Q_v + 0,8 \times 1,5 \times Q_{punt}$$

$$\text{Combinatie B} = 1,2 \times E_g + 0,8 \times 1,5 \times Q_v + 1,5 \times Q_{punt}$$

Op de balk werkt het eigen gewicht van de balk en van de asfaltlaag. Daarnaast wordt voor dit deel ook de variabele verdeelde belasting in rekening gebracht. De q-last uit eigen gewicht en asfaltlaag is:

$$10 \times (0,4 \times 2500 + 0,3 \times 2150) \times 1,2 = 19,74 \text{ kN/m}$$

Zoals eerder genoemd is en in figuur 6 getekend is, bestaat de variabele belasting door het verkeer uit twee verschillende q-lasten. Deze zijn 2,5 kN/m en 9 kN/m. Voor de duidelijkheid wordt 2,5 kN/m variabele 1 en 9 kN/m variabele 2 genoemd.

Volgens Eurocode 1 mag er bij een combinatie van twee verkeerslasten één van de lasten met een karakteristieke waarde (ψ_0) vermenigdvuldigd worden. Voor een combinatie TS en UDL geeft Eurocode 1 een waarde van $\psi_0 = 0,8$.

Hierdoor zal in Combinatie A variabele 1: $2,5 \times 1,5 = 3,75$ kN/m zijn en variabele 2 zal $1,5 \times 9 = 13,5$ kN/m zijn. In Combinatie B zal variabele 1 $0,8 \times 1,5 \times 2,5 = 3$ kN/m zijn en variabele 2 zal $0,8 \times 1,5 \times 9 = 10,8$ kN/m zijn.

De puntlast (Q_{punt}) volgt uit de aslasten van de vrachtwagens. In paragraaf 2.4.3 over verkeersbelastingen is gebleken dat er voor de breedte van het wegdek er twee puntlasten ontstaan die ieder twee meter uit elkaar staan. Elke puntlast heeft een waarde van 300 kN. Bij combinatie A heeft de belasting uit de puntlast dus een waarde van ieder $0,8 \times 1,5 \times 300 = 360$ kN en bij combinatie B hebben beide puntlasten een waarde van $1,5 \times 300 = 450$ kN.

De twee combinaties en twee plekken van puntlasten leveren dus per situatie vier moment en dwarskrachtlijnen. Om inzicht te krijgen in de momentlijnen en dwarskrachtlijnen bij verschillende afstanden, worden bij een afstand van 2200, 2600, 3000 en 3400 mm tussen de opleggingen alle verschillende moment en dwarskrachtlijnen bepaald. De figuren die eruit zijn gekomen, zijn aan het einde van bijlage B weergegeven in figuur 48 tot en met figuur 63. De resultaten van de berekeningen staan in de tabellen 3 en 4.

Afstand tussen opleggingen	A loc.1	A loc.2	B loc.1	B loc.2
2200	-689,46	398,22	-850,45	484,92
2600	-596,14	404,13	-731,28	490,43
3000	-528,03	410,23	-644,34	496,11
3400	-487,85	416,46	-578,64	501,88

Tabel 3: Maximale Dwarskracht bij combinaties in kN

Afstand tussen opleggingen	A loc.1	A loc.2	B loc.1	B loc.2
2200	-726,70	-46,35	-896,29	-44,20
2600	-645,96	100,84	-797,87	126,88
3000	-566,43	190,30	-700,58	233,24
3400	-476,67	279,66	-604,22	339,50

Tabel 4: Maximale Moment bij combinaties in kNm

In de bovenste tabel is per tussenafstand van de opleggingen aangegeven wat bij welke belastingcombinatie de maximale dwarskracht is. In de onderste tabel is dit gedaan voor de maximale momenten. Uit tabel 3 & 4 is af te lijden dat combinatie B met locatie 1 (B loc.1) de maatgevende combinatie en plaats is voor zowel dwarskracht als buigend moment. Dit is echter een uiterst zeldzame en extreme situatie waarbij de vrachtwagen helemaal op de flens van de koker rijdt. De verwachting is dat deze situatie, in vergelijking tot de uiterste waarde bij locatie 2, veel minder vaak voor komt. Daarom wordt ook gekeken naar locatie 2. Als locatie 2 voor beide belastingcombinaties vergeleken wordt blijkt dat hier ook belasting combinatie B maatgevend is.

Uit de tabellen komt naar voren dat een afstand tussen de opleggingen van 3400 mm de meest gunstige waarde geeft voor combinatie B locatie 1. Voor combinatie B locatie 2 blijken bij die afstand de dwarskrachten en momenten wel het grootst te zijn, maar ze zijn nog steeds veel kleiner dan de waarde bij locatie 1. Omdat de wapening toch voor deze maximale situatie wordt bepaald is dit geen probleem en dus is vanuit deze vergelijking een tussenafstand van 3400 mm de beste keuze.

De afstand tussen de opleggingen geeft nog niet direct de breedte van de onderflens van de constructie. Daarvoor dient nog eenmaal de lijfbreedte(B_v) te worden opgeteld. De breedte van de onderflens wordt dan $3400 + B_v^2$.

² Uit de bepaling van de breedte van de onderflens is gebleken dat in principe een tussenafstand van 3400 mm maatgevend is. Echter is er op een vroeg moment in dit onderzoek al verder gerekend met een tussenafstand van 3000 mm. Volgens de berekeningen blijkt dit dus niet te kloppen. Omdat hier tijdens dit onderzoek wel mee gerekend is wordt in het verder onderzoek de breedte van de onderflens bepaald volgens: $3000 + B_v$. Indien er opnieuw een kokerligger wordt ontworpen wordt aangeraden om bovenstaande methode te gebruiken om zo eerder in het proces een voor de constructie voordeligere onderste lijfbreedte te bepalen.

2.5.3 Hoogte bovenflens

Met een simpele berekening van het wapeningspercentage wordt gekeken of de eerder aangenomen hoogte van de bovenflens van 400mm klopt.

$$z = 0,9 \times d = 0,9 \times 400 = 360mm$$

$$M_{Ed} = F_{Ed} \times z \Rightarrow F_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{z}$$

waarbij M_{Ed} het moment in het meest extreme geval is, dus 700,58 kNm. Uiteindelijk wordt F_{Ed} dan:

$$\frac{700,58}{0,36} = 1946 \text{ kN}$$

Nu is de kracht bekend die het wapeningsstaal op zich moet nemen. Uit deze kracht wordt de oppervlakte van het staal bepaald volgens:

$$f_{yd} = \frac{F_{Ed}}{A_s} \Rightarrow A_s = \frac{F_{Ed}}{f_{yd}}$$

. De rekenkundige treksterkte van het wapeningsstaal is in paragraaf 2.3.2 vastgelegd op 435 N/mm^2 wat gelijk is aan 435000 kN/m^2 . Dus wordt de oppervlakte van het wapeningsstaal:

$$\frac{1946}{435000} = 0,0044473m^2$$

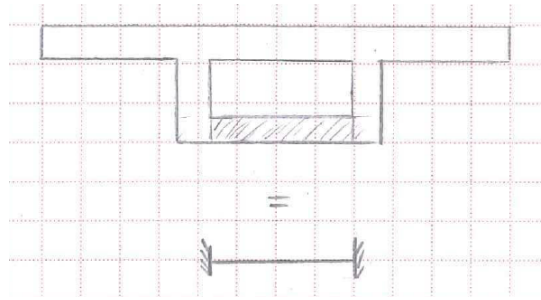
A_c is eerder al vastgesteld op $0,4 \times 1 = 0,4m^2$. Het percentage wapeningsstaal (ρ) wordt dan bepaald door

$$\rho = \frac{A_s}{A_c} \times 100 = \frac{0,0044473}{0,4} \times 100 = 1,18 \%$$

Het benodigde wapeningspercentage blijkt dus 1,18% te zijn wat dicht in de buurt ligt van het beoogde wapeningspercentage van ongeveer 1%. De aangenomen hoogte van 400 mm is dus realistisch en hoeft niet te worden gewijzigd.

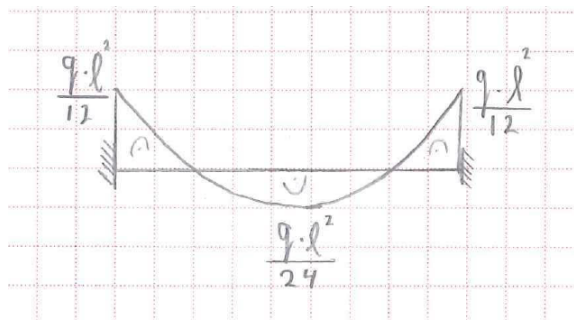
2.5.4 Hoogte onderflens

De hoogte van de onderflens wordt aan de hand van de rest van de doorsnede dimensies in eerste instantie geschat op 300 mm. Aan de hand van een betonberekening wordt nu gekeken of dit kan voldoen met een normaal wapeningspercentage. Op dit constructiedeel zal alleen het eigen gewicht van de balk van toepassing zijn.



Figuur 11: Mechanica schematisering beneden balk

Om de krachten in de onderflens te bepalen wordt deze geschematiseerd als een balk met een breedte van 1 meter ingeklemd tussen de twee lijven. Dit is weergegeven in figuur 11. De momentlijn die bij dit mechanica schema hoort is inclusief de 'vergeet-me-nietjes' hieronder weergegeven in figuur 12



Figuur 12: Momentlijn met vergeet-me-nietjes

De lengte van deze schematisering is maximaal als de lijven van de verticale balk minimaal zijn. Omdat de hoogte van de bovenflens bepaald is op 400 mm, wordt vanwege gelijke dimensies en de verwachte benodigde breedte voor de voorspankabels, de minimale breedte van het lijf bepaald op 400 mm. De lijfbreedte is in het verder onderzoek variabel, maar het minimum wordt voorlopig aangenomen op 400 mm. Daardoor wordt in deze schematisering de lengte van de balk $(3000 + 400) - 2 \times 400 = 2600$ mm.

De balk is nu 2600 bij 300 bij 1000 mm. Dit geeft een eigen gewicht van 7,5 kN/m. Maal de veiligheidsfactor van 1,2 geeft dit een waarde van 9 kN/m. Volgens de welbekende vergeet-me-nietjes geeft dit een moment in de opleggingen van

$$\frac{9 \times 2,6^2}{12} = 5,07 \text{ kNm}$$

en een moment in het midden van de balk van

$$\frac{9 \times 2,6^2}{24} = 2,54 \text{ kNm}$$

Om de nuttige hoogte te bepalen wordt er vanuit gegaan dat deze $300 - 50 = 250 \text{ mm}$ is. Het benodigde wapeningspercentage wordt dan bepaald volgens:

$$\rho = \frac{M_{Ed}}{0,9 d^2 b f_{yd} 10^{-2}} = \frac{5,07 \times 10^6}{0,9 \times 250^2 \times 1000 \times 435 \times 10^{-2}} = 0,021 \%$$

Dit percentage ligt onder het minimumpercentage (volgens Euro-code 2) van:

$$\rho_{min} = 0,26 \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} = 0,26 \times \frac{4,2}{500} = 0,22 \%$$

Dus geldt dat het wapeningspercentage 0,22 % moet zijn. Het is logisch dat met alleen het eigen gewicht als belasting er zon laag wapeningspercentage uitkomt. Dit lage wapeningspercentage indi-ceert dat volgens deze toets de hoogte van de onderste balk te hoog is. Toch wordt de hoogte van de balk niet aangepast omdat er verwacht wordt dat deze hoogte wel nodig is indien er torsie momenten in de constructie gaan meespelen. En voor de verhoudingen van de constructie zou het niet gepast zijn om de onderste balk heel dun te maken en de bovenste balk heel dik.

2.6 VOORSPANNING

Om de overspanning van 50 meter te overbruggen wordt er voorge-spannen. In dit gedeelte wordt een theoretische uitleg gegeven over hoe de berekening met voorspanning gebeurt. Daarna wordt er aan de hand van enkele berekeningen met een aantal maxima en minima de hoogte van de totale constructie vastgelegd. Als laatste wordt er een berekening gegeven waardoor het voorspansysteem wordt vast-gelegd en de minimale lijfbreedte wordt bepaald.

2.6.1 Theoretische bepaling

2.6.1.1 Belastingsgevallen

Voor de bepaling van de voorspanning is het nodig verschillende be-lastinggevallen te onderscheiden. Er kan onderscheid gemaakt wor-den tussen de volgende belastingen:

Q_{ik} = Variabele puntlasten door verkeersbelasting

Q = Variabele verdeelde verkeersbelasting

G_s = Permanente verdeelde belasting door asfaltlaag

G = Permanente verdeelde belasting van eigen gewicht

Daarmee wordt er vanuit gegaan dat de belasting uit het eigen ge-wicht vanaf begintijdstip ($t = 0$) aanwezig is. De permanente belas-ting van de asfaltlaag wordt pas later van kracht als deze aangelegd

wordt.

De verkeersbelasting is opgedeeld in een variabele verdeelde verkeersbelasting en twee variabele puntlasten. De variabele puntlast is een unieke last die alleen in de uiterste situatie gecombineerd met de verdeelde verkeersbelasting optreedt. Deze wordt dus alleen meegenomen bij het rekenen in de uiterste grenstoestand.

De twee puntlasten zijn zo gesitueerd dat deze zo ongunstig mogelijk op de ligger staan. Zoals eerder al vermeld bij de aslastbepaling is de afstand tussen de assen (L_{as}) van de vrachtwagen ongeveer 10 meter. Daarom worden er bij de puntlastensituatie vanuit het midden gezien twee lasten van ieder $Q_{ik} = 300 \text{ kN}$, 5 m t.o.v. het midden van de ligger geplaatst.

De totale verdeelde belasting in bruikbaarheids grenstoestand (BGT) is:

$$q_{BGT} = Q + G_s + G \quad (1)$$

Het buigend moment in de BGT is:

$$M_{BGT} = \frac{1}{8} q_{BGT} l^2 \quad (2)$$

Het buigend moment op ($t = 0$) wordt alleen bepaald door het eigen gewicht van de constructie:

$$M_{t=0} = \frac{1}{8} G l^2 \quad (3)$$

Het buigend moment in de UGT is iets gecompliceerder te bepalen. Dit komt doordat hierbij de verdeelde en de punt verkeersbelastingen gecombineerd moeten worden. Volgens Eurocode 1 volgt bij een combinatie van twee verkeerslasten dat een van de twee lasten met de karakteristieke combinatie waarde ψ_0 vermenigvuldigd moet worden. Voor een combinatie van TS en UDL geeft Eurocode 1 een waarde van $\psi_0 = 0,8$

Deze combinatie geeft de volgende twee formules voor het buigend moment in UGT:

$$M_{UGT^A} = \frac{1}{8} 1,2 (G_s + G) l^2 + \psi_0 \frac{1}{8} 1,5 Q l^2 + 1,5 Q_{ik} \left(\frac{1}{2} l - \frac{L_{as}}{2} \right) \quad (4)$$

$$M_{UGT^B} = \frac{1}{8} 1,2 (G_s + G) l^2 + \frac{1}{8} 1,5 Q l^2 + \psi_0 1,5 Q_{ik} \left(\frac{1}{2} l - \frac{L_{as}}{2} \right) \quad (5)$$

De maximale waarde van vergelijking 4 en 5 geeft het bepalende moment voor de uiterste grenstoestand.

2.6.1.2 Eisen voorspanning

Indien totale hoogte en lijfbreedte worden bepaald, kunnen de dimensie constante van de kokerligger worden bepaald. Dit zijn respectievelijk de oppervlakte (A_c), het normaalkrachtencentrum (N_c), Het traagheidsmoment in z richting (I_{zz}), de beide weerstandsmomenten in de boven (W_{ct}) en onderkant (W_{cb}) en het bovenste (k_{ct}) en het onderste punt (k_{cb}) van het kernoppervlak. Uiteraard kan aan de hand van de oppervlakte het eigen gewicht van de constructie worden bepaald.

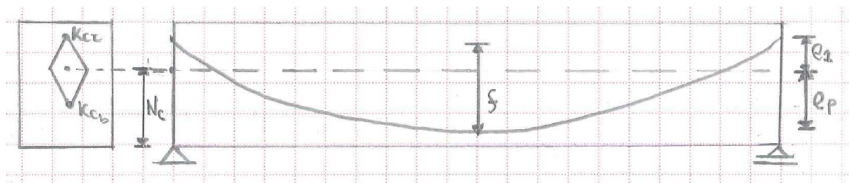
Naast het eigen gewicht, is een andere parameter die benodigd is om de voorspankracht te bepalen, de pijl van de voorspankabels in het midden van de overspanning. Om de maximale pijl te bepalen wordt aangenomen dat de afstand vanaf de onderkant van de constructie tot het zwaartepunt van de kabels (Z_{gb}) in het midden van de ligger minstens 250 mm is. De 250 mm is benodigd voor de minimale betondekking op de langswapening en de voorspankabels zelf. De pijl is daarnaast maximaal als het zwaartepunt van de kabels aan de uiteinde van de liggers zich in de top van het kernoppervlak (k_{ct}) bevindt. De top van het kernoppervlak wordt bepaald volgens:

$$k_{ct} = \frac{W_{cb}}{A_c} \quad (6)$$

De maximale pijl van de voorspankabels wordt dan als volgt:

$$f_{p,max} = N_c + k_{ct} - Z_{gb} \quad (7)$$

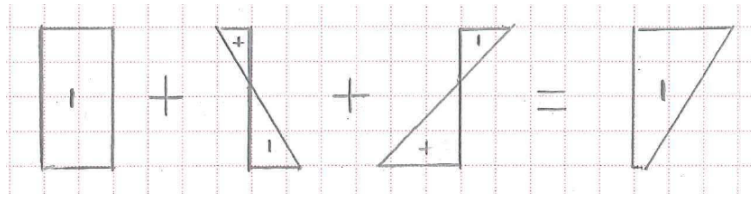
In figuur 13 is bovenstaande geschematiseerd.



Figuur 13: Langsdoorsnede met pijl en excentriciteit

Belangrijk is om op te merken dat de voorspankabels niet in het normaalkrachtencentrum aangrijpen, maar er boven. De gevolgen hiervan zullen terug komen bij de precieze bepaling van de voorspankracht.

Met de bepaling van de pijl kunnen vergelijkingen worden gegeven om de benodigde voorspankracht in een rechte ligger te bepalen. De voorspanning moet de spanningen vanuit de belasting opheffen. Daarbij wordt er eerst gekeken naar de situatie waarbij er in de onderste vezel van de constructie geen trekspanning plaatsvindt. De spanningssituatie die in de constructie moet plaatsvinden is geïllustreerd in figuur 14.



Figuur 14: Spanningsdiagrammen

De eerste twee diagrammen volgen uit de voorspanning. De voorspanning zorgt voor een over de hoogte gelijke drukspanning vanuit het trekken aan de kabel en voor een krommingsspanning vanuit de parabolische ligging in de ligger. Deze krommingsspanning geeft onderin een drukspanning en bovenin een trekspanning. Het derde diagram laat de spanning uit de belasting op de constructie zien. Deze geeft uiteraard bovenin de constructie een drukspanning en onderin de constructie en trekspanning. De voorspanning moet er voor zorgen dat in de hele doorsnede een drukspanning optreedt.

Met betrekking tot de voorspanning zijn er 3 eisen bepalend voor het ontwerp. Aan de hand van deze eisen wordt de voorspankracht bepaald en gecheckt of deze over het hele tijdsinterval van de constructie voldoet. De 3 eisen worden hieronder een voor een doorlopen.

Eis 1: Geen trekspanning onderste vezel op $t = \infty$

De eerste stap is om de benodigde voorspankracht in het midden van de kokerligger te bepalen. De constructie wordt zo getoetst dat het moment uit de voorspanning minstens zo groot moet zijn als het buigend moment van alle belastingen op $t = \infty$. Bij volledig voorgespannen beton moet er worden gerekend vanuit de bruikbaarheidsgrenstoestand (BGT).

Voor de voorspankrachten in de onderkant van het midden van de ligger geldt de volgende eis.

$$-\frac{P_{m,\infty}}{A_c} - \frac{M_p}{W_{cb}} + \frac{M_{BGT}}{W_{cb}} \leq 0 \quad (8)$$

Zoals in figuur 13 te zien is, grijpen de voorspankabels boven het normaalkrachtencentrum aan. Daarom geldt voor het buigendmoment uit voorspankracht:

$$M_p = -e_1 P_{m,\infty} + \frac{1}{8} q_p l^2 \quad (9)$$

Omdat de ligger statisch bepaald is, kan voor de krommingsdruk de volgende vergelijking worden gegeven:

$$q_p = \frac{8 P_{m,\infty} f}{l^2} \quad (10)$$

Door deze twee vergelijkingen te combineren verkrijgt men:

$$M_p = -e_1 P_{m,\infty} + f P_{m,\infty} = P_{m,\infty}(f - e_1) = P_{m,\infty} e_p \quad (11)$$

Voor de excentriciteit van de voorspankabels (e_p) geldt dus $e_p = f - e_1$.

Vergelijking 11 kan nu worden ingevuld in vergelijking 8.

$$-\frac{P_{m,\infty}}{A_c} - \frac{P_{m,\infty}(f - e_1)}{W_{cb}} + \frac{M_{BGT}}{W_{cb}} \leq 0 \quad (12)$$

Door bovenstaande formule om te schrijven wordt de benodigde voorspankracht ($P_{m,\infty}$) op $t = \infty$ bepaald aan de hand van de volgende formule.

$$P_{m,\infty} \geq \frac{M_{BGT}}{\frac{W_{cb}}{A_c} + (e_p)} \quad (13)$$

Om de initiele voorspankracht op $t=0$ te bepalen wordt er aangenomen dat de tijdsafhankelijke verliezen en de wrijvingsverliezen samen 20% zijn. De initiele voorspankracht $P_{m,0}$ wordt dan bepaald volgens:

$$P_{m,0} = \frac{P_{m,\infty}}{0,8} \quad (14)$$

Eis 2: Geen trekspanning bovenste vezel op $t=0$

Op $t=0$ is de eis dat er geen trekspanning in de bovenste vezel van de doorsnede mag plaatsvinden onder de belasting van alleen het eigen gewicht. Dit leidt tot de volgende formule:

$$\sigma_{ct} = -\frac{P_{m,0}}{A_c} + \frac{P_{m,0} e_p}{W_{ct}} - \frac{M_{t=0}}{W_{ct}} \leq 0 \quad (15)$$

Eis 3: Geen overschrijding maximale drukspanning onderste vezel op $t = 0$

Naast dat er geen trekspanning in de bovenste vezel mag plaatsvinden, is er ook de eis dat op $t = 0$ in de onderste vezel de maximale drukspanning niet overschreden wordt. Voor de maximale drukspanning op het moment van voorspannen geldt de volgende formule:

$$\sigma_c = 0,6 f_{ck}(t) \quad (16)$$

De eis waaraan de voorspanning moet voldoen wordt dan:

$$\sigma_{cb} = \frac{P_{m,0}}{A_c} + \frac{P_{m,0} e_p}{W_{cb}} - \frac{M_{t=0}}{W_{cb}} \leq \sigma_c \quad (17)$$

Vanuit de eerste eis kan dus de benodigde voorspanning worden bepaald. Als deze voorspankracht dan voldoet voor de tweede en

derde eis is de bepaalde voorspankracht toepasbaar op de constructie. Indien deze voorspankracht bekend is, kan het aantal en benodigde hoeveelheid kabels bepaald worden.

2.6.1.3 Voorspankabels

Na evaluatie van verschillende leveranciers van voorspanningssystemen is gekozen om gebruik te maken van het Dywidag systeem [2].

Zoals al vermeld wordt met het voorgespannen strengensysteem 'ASTM A 416' gewerkt. De specificaties van dit systeem zijn eerder getoond in figuur 3 en figuur 4. De strengen hebben een karakteristieke trekspanning (f_{pk}) van 1860 N/mm^2 . De maximale toelaatbare spanning (σ_{pm0}) van het voorspanstaal is dan:

$$0,75 \times f_{pk} = 0,75 \times 1860 = 1395 \text{ N/mm}^2$$

De oppervlakte van een streng (A_{streng}) is 140 mm^2 .

Het minimaal aantal strengen wordt dan met de voorspankracht in Newton bepaald volgens de volgende vergelijking:

$$n_{strengen} = \frac{P_{m,0}}{\sigma_{pm0} \times A_{streng}} = \frac{P_{m,0}}{1395 \times 140} \quad (18)$$

Het hangt er nu vanaf hoeveel buizen er kunnen worden geplaatst, wat de buisdiameter is en dus wat het aantal strengen per buis wordt hoe de plaatsing van de voorspanbuizen er uit komt te zien. In de volgende paragraaf wordt daar op in gegaan.

De plaatsing van de buizen en het aantal buizen heeft ook nog invloed op de gezamenlijke pijl die de voorspankabels hebben en op de kromtestraal van de constructie. In het hoofdstuk over kromming wordt daar verder op ingegaan.

2.6.2 Voorbeeldberekening

In deze paragraaf wordt een berekening gemaakt met betrekking tot het voorspanstelsel. Uit deze berekening volgt de minimale hoogte van de constructie en afhankelijk van de nog variabele lijfbreedte de beste indeling van de voorspankabels. Dit bepaald onder andere de minimale breedte van de constructie en de te gebruiken voorspankabels.

2.6.2.1 Maximale en minimale gevallen

Om een voorspanstelsel te bepalen die voor elke vervolgsituatie geschikt is wordt er een minimale en maximale situatie genomen van de constructie. Dit wordt gedaan door de twee nog van toepassing zijnde variabelen voor de doorsnede een minimale en maximale

waarde te geven. Per combinatie van waarde kan dan de benodigde voorspanning worden bepaald en worden vergeleken. In tabel 5 zijn de eerder vastgelegde dimensies te vinden.

Omschrijving	Waarde	Eenheid
Breedte bovenflens	6000	mm
Breedte benedenflens	3000 + breedte verticale balk	mm
Hoogte bovenflens	400	mm
Hoogte onderflens	300	mm

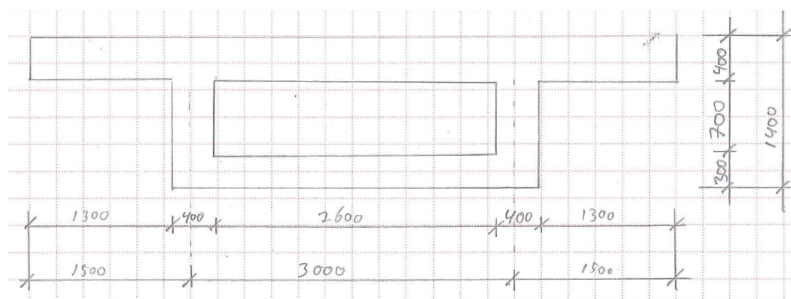
Tabel 5: Vastgelegde dimensies

Voor de breedte van de verticale balk wordt verwacht dat deze tussen minimaal 400 mm en maximaal 1000 mm zal liggen. En voor de hoogte van de constructie wordt een bereik aangenomen tussen de 1400 en de 2200 mm. De waarde tussen deze twee hoogtes in (1800 mm) wordt ook onderzocht. Met deze minima en maxima en de tussengelegen waarde zijn er zes combinaties mogelijk. In tabel 6 zijn deze zes combinaties met hun bijbehorende oppervlakte vermeld.

hoogte ligger totaal (mm)	oppervlakte bij breedte 400 mm	oppervlakte bij breedte 1000 mm
1400	3980000	5000000
1800	4300000	5800000
2200	4620000	6600000

Tabel 6: Oppervlaktes combinaties

In deze voorbeeldberekening zal in eerste instantie worden gerekend met de meest minimale situatie. Dat wil zeggen met het ontwerp waarbij de totale hoogte is vastgesteld op 1400 mm en de breedte van de lijven op 400 mm. Voor de andere 5 combinaties worden daarna alleen de resultaten getoond. Van de hierna door te rekenen doorsnede zijn in figuur 15 de dimensies weergegeven. De lengte van de overspanning blijft voor alle combinaties gelijk; namelijk 50 meter.



Figuur 15: Dimensies doorsnede

Met deze dimensies gelden de doorsnedeconstanten te zien in tabel 7.

omschrijving	afkorting	waarde	eenheid
oppervlakte doorsnede	Ac	3,98	m^2
Normaalkrachten centrum z richting	Nc	0,854	m
Traagheidsmoment z richting	Izz	0,879	m^4
Weerstandsmoment boven	Wct	1,61	m^3
Weerstandsmoment beneden	Wcb	1,03	m^3

Tabel 7: Waarden standaard ontwerp

Naast deze waarden is nog een laatste waarde benodigd om de voorspankracht te kunnen bepalen en dat is de excentriciteit van de voorspankabels. Voor de berekening wordt uitgegaan van de maximale pijl die wordt bepaald volgens eerder genoemde vergelijking 7. Deze is onder meer afhankelijk van de top van het kernoppervlak welke volgens vergelijking 6 bepaald wordt door het weerstandsmoment in de onderste vezel gedeeld door het oppervlak van de doorsnee. Uiteindelijk wordt de pijl met vergelijking 6 en 7 dan:

$$f_{p,max} = 0,854 + \frac{1,03}{3,98} - 0,25 = 0,96(m)$$

Maar omdat deze pijl boven het normaalkrachtencentrum aangrijpt, wordt gerekend met de maximale excentriciteit vanuit het normaalkrachtencentrum. Dit is verduidelijkt weergegeven in vergelijking 11. Wat in deze vergelijking beschreven staat, is dat de extra afstand vanaf het normaalkrachtencentrum een negatief moment veroorzaakt, dus van de totale pijl kan worden afgetrokken. Voor de maximale excentriciteit geldt dus:

$$e_{p,max} = 0,854 - 0,25 = 0,60(m)$$

Om de benodigde voorspankracht op $t = 0$ te bepalen, wordt er eerst gekeken naar de eerste gestelde eis: geen trekspanning in de onderste vezel op $t = \infty$.

Om deze te berekenen moet eerst het maximale moment in de bruikbaarheidsgrenstoestand worden bepaald. Bij het maximale moment zijn de variabele verdeelde verkeersbelasting en beide permanente belastingen van toepassing. De variabele belasting (Q) is bepaald in paragraaf 2.4.3 en bedraagt 36,78 kN/m. De asfaltlaagbelasting (Gs) is ook al bepaald in paragraaf 2.4.1 en bedraagt 33,54 kN/m. De laatste last is het eigen gewicht (G) van de constructie. Met een oppervlak van 3,98 m^2 bedraagt deze:

$$G = 10 \times 3,98 \times 2,5 = 99,5 \text{ kN/m}$$

Het maximale moment in BGT wordt dan bepaald aan de hand van formule 2:

$$M_{BGT} = \frac{1}{8} (Q + G_s + G) l^2 = \frac{1}{8} \times (36,78 + 33,54 + 99,5) \times 50^2 = 53067 \text{ kNm}$$

De minimaal benodigde voorspankracht wordt dan met formule 13 als volgt bepaald:

$$P_{m,\infty} \geq \frac{M_{BGT}}{\frac{W_{cb}}{A_c} + (e_{p,max})} = \frac{53067}{\frac{1,03}{3,98} + 0,60} = 61550 \text{ kN}$$

Vergelijking 14 geeft dan:

$$P_{m,0} = \frac{P_{m,\infty}}{0,8} = \frac{61550}{0,8} = 76938 \text{ kN}$$

Uit de eerste eis dat er geen trekspanning in de onderste vezel op $t=0$ mag plaatsvinden, is nu de minimale benodigde voorspanning bepaald. Aan de hand van deze minimale voorspankracht wordt gecontroleerd of deze kracht aan de andere twee eisen voldoet. De eerste controle betreft de tweede eis dat er op $t = 0$ geen trekspanning in de bovenste vezel mag plaatsvinden.

Om deze te berekenen is het moment op $t = 0$ nodig. Deze is volgens vergelijking 3:

$$M_{t=0} = \frac{1}{8} G l^2 = \frac{1}{8} \times 99,5 \times 50^2 = 31094 \text{ kNm}$$

De spanning in de bovenste vezel wordt dan:

$$\sigma_{ct} = -\frac{P_{m,0}}{A_c} + \frac{P_{m,0} e_{p,max}}{W_{ct}} - \frac{M_{t=0}}{w_{ct}} = -\frac{76938}{3,98} + \frac{76938 \times 0,60}{1,61} - \frac{31094}{1,61} = -9791 \text{ kN/m}^2$$

Dit is kleiner dan nul wat betekend dat aan de eis wordt voldaan.

De derde eis stelt dat de maximale drukspanning in de onderste vezel niet overschreden mag worden. De maximale drukspanning wordt bepaald aan de hand van formule 16:

$$\sigma_c = 0,6 f_{ck}(t) = 0,6 \times 55000 = 33000 \text{ kN/m}^2$$

De spanning in de onderste vezel wordt gegeven door:

$$\sigma_{cb} = \frac{P_{m,0}}{A_c} + \frac{P_{m,0} e_{p,max}}{W_{cb}} - \frac{M_{t=0}}{w_{cb}} = \frac{76938}{3,96} + \frac{76938 \times 0,6}{1,03} - \frac{31094}{1,03} = 34232 \text{ kN/m}^2$$

De drukspanning in de onderste vezel is helaas groter dan de maximaal toelaatbare drukspanning.

Dit geeft aan dat voor deze doorsnede, met een breedte van de verticale balken van 400 mm en een hoogte van de totale ligger van 1400 mm, de voorwaarden niet voldoen en er dus naar een andere optie gekeken moet worden. In de volgende paragraaf zal per optie de uitkomst worden getoond. Aan de hand daarvan zal de hoogte van de totale constructie worden vastgelegd.

2.6.3 Totale hoogte constructie

In de vorige paragraaf is ter illustratie bij een breedte (b) van 400 mm en een hoogte (h) van 1400 mm de voorspanning helemaal doorgerekend. Bovenstaande berekening is in een excel bestand gemodelleerd, waardoor makkelijk verschillende situaties kunnen worden doorgerekend. In deze paragraaf is voor de verschillende combinaties (te zien in tabel 6) met behulp van dit excel model de benodigde voorspanning op de drie eisen getest. Onderstaand worden de resultaten daarvan gepresenteerd.

Combinatie 1: b = 400, h = 1400 mm:

Deze is bepaald in de vorige paragraaf. De resultaten voor deze combinatie zijn:

$$Eis\ 1 : P_{m,0} > 76938\ kN$$

$$Eis\ 2 : -9791 < 0\ N/mm^2\ dus\ voldoet$$

$$Eis\ 3 : 34232 > 33000\ N/mm^2\ dus\ voldoet\ niet!$$

Combinatie 2: b = 400, h = 1800 mm:

$$Eis\ 1 : P_{m,0} > 57311\ kN$$

$$Eis\ 2 : -7079 < 0\ kN/m^2\ dus\ voldoet$$

$$Eis\ 3 : 23208 < 33000\ k/m^2\ dus\ voldoet$$

Combinatie 3: b = 400, h = 2200 mm:

$$Eis\ 1 : P_{m,0} > 46696\ kN$$

$$Eis\ 2 : -5606 < 0\ kN/m^2\ dus\ voldoet$$

$$Eis\ 3 : 17186 < 33000\ kN/m^2\ dus\ voldoet$$

Combinatie 4: b = 1000, h = 1400 mm:

$$Eis\ 1 : P_{m,0} > 72106\ kN$$

$$Eis\ 2 : -3318 < 0\ kN/m^2\ dus\ voldoet$$

$$Eis\ 3 : 28969 < 33000\ kN/m^2\ dus\ voldoet\ niet!$$

Combinatie 5: $b = 1000$, $h = 1800$ mm:

$$Eis\ 1 : P_{m,0} > 75623\text{ kN}$$

$$Eis\ 2 : -8206 < 0\text{ kN/m}^2\text{ dus voldoet}$$

$$Eis\ 3 : 19294 < 33000\text{ kN/m}^2\text{ dus voldoet}$$

Combinatie 6: $b = 1000$, $h = 2200$ mm:

$$Eis\ 1 : P_{m,0} > 64952\text{ kN}$$

$$Eis\ 2 : -6486 < 0\text{ kN/m}^2\text{ dus voldoet}$$

$$Eis\ 3 : 14110 < 33000\text{ kN/m}^2\text{ dus voldoet}$$

De conclusie die uit deze resultaten getrokken kan worden, is dat de in eerste instantie aangenomen hoogte van 1400 mm helaas niet voldoet. Bij een overspanning van 50 meter en bij een betonklasse van C55/67 voldoet de hoogte voor de minimale breedte (400 mm) niet aan de eis van de maximale drukspanning die in de onderste vezel mag plaatsvinden.

De andere combinaties voldoen wel aan alle eisen. Om toch te kunnen voorspannen voor de vastgelegde range van de breedte van de lijven, wordt de totale hoogte van de doorsnede vastgelegd op 1800 mm.

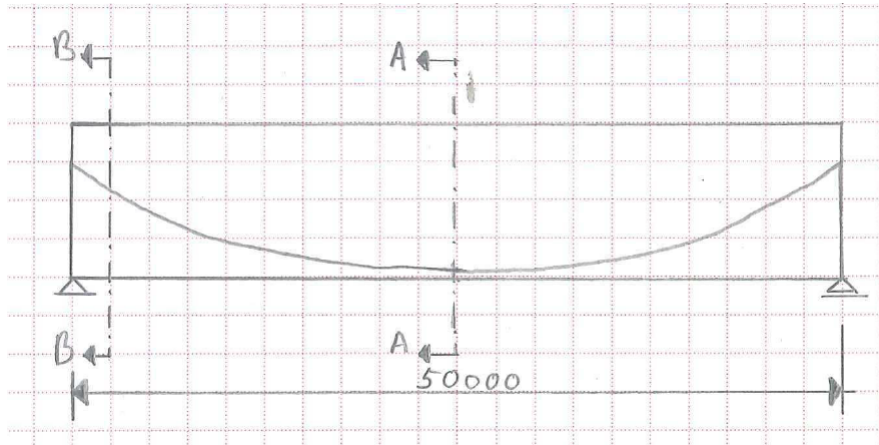
2.6.4 Keuze voorspansysteem

In de vorige paragraaf is de hoogte van de doorsnede bepaald op 1800 mm. Uit de resultaten van de minimale lijfbreedte (400 mm) wordt nu het minimum aantal voorspankabels en het exacte voorspanprofiel worden bepaald. In excel is, in navolging op het excel model voor de bepaling van hoogte van de constructie, een opvolgend model gemaakt waarin de lijfbreedte, het aantal voorspankabels en de diameter van de voorspankabels als variabele zijn ingevoerd. De vastgelegde dimensie doorsnedes zijn als (eventueel aanpasbare) constanten ingevoerd. Aan de hand van dit model is de optimale configuratie bepaald voor het voorspannen van een rechte kokerligger.

Uit deze modellering is naar voren gekomen dat het toepassen van de maximale diameter van 138,4 mm, waarbij 37 strengen kunnen worden geplaatst, het voordeligste is voor de plaatsing van de buizen. Daarbij is ook naar voren gekomen dat er dan minimaal twee kabels naast elkaar geplaatst moeten worden, waardoor de lijfbreedte

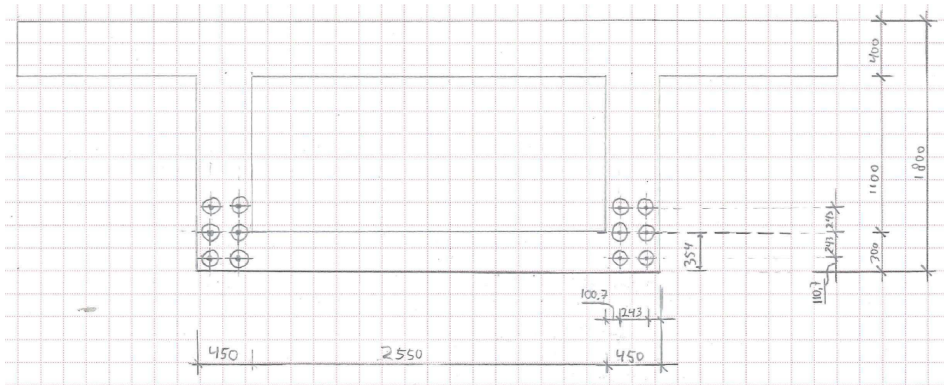
minimaal 500 mm breedte dient te zijn. In bijlage C is de complete bepaling en berekening van deze waarden terug te vinden. Om de plaatsing van de kabels te verduidelijken zijn hieronder drie figuren weergegeven.

In figuur 16 is een doorsnede van de lengterichting te zien. In deze figuur zijn de plaatsen van de doorsnedes A-A en B-B te zien. Per doorsnede wordt de precieze locatie van de kabels getoond.



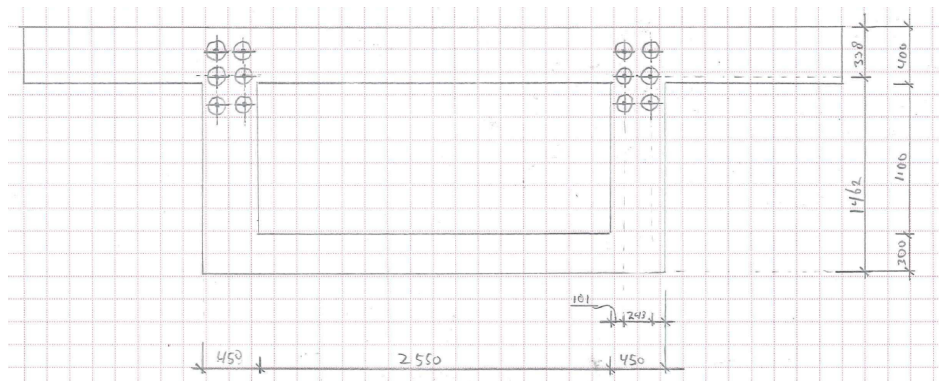
Figuur 16: Doorsnede ligger in lengterichting

In figuur 17 laat doorsnede A-A de positie van de kabels zien in het midden van de ligger.



Figuur 17: Doorsnede A-A plaatsing voorspankabels

Figuur 18 laat doorsnede B-B zien met de posities van de kabels aan de uiteindes van de ligger.



Figuur 18: Doorsnede B-B plaatsing voorspankabels

2.7 TUSSENTIJDSE CONCLUSIES

Uit het voorgaande hoofdstuk kan worden vastgesteld dat alle dimensies van de doorsnede zijn vastgelegd, behalve de beoogde breedte van de lijven. Deze breedte is expres niet vastgelegd, zodat de relatie van de lijfdikte met de maximale kromming van het viaduct onderzocht kan worden. Wat wel is vastgesteld is dat de breedte van de verticale balk minimaal 500 mm moet bedragen vanwege de plaatsing van de voorspankabels. Dit komt door de tevens vastgelegde buisdiameter van 138,4 mm.

In tabel 8 zijn deze dimensies van de constructie nogmaals genoemd.

omschrijving	waarde	eenheid
Lengte boven	6000	mm
Lengte beneden	3000 + lijfbreedte	mm
Totale hoogte	1800	mm
Hoogte bovenste balk	400	mm
Hoogte onderste balk	300	mm

Tabel 8: Vastgestelde dimensies doorsnede

De dimensies zijn bepaald bij de krachtenverdeling op een rechte ligger. Uit de berekeningen in het volgende hoofdstuk moet blijken of deze dimensies ook voldoen indien de ligger sterk gekromd wordt.

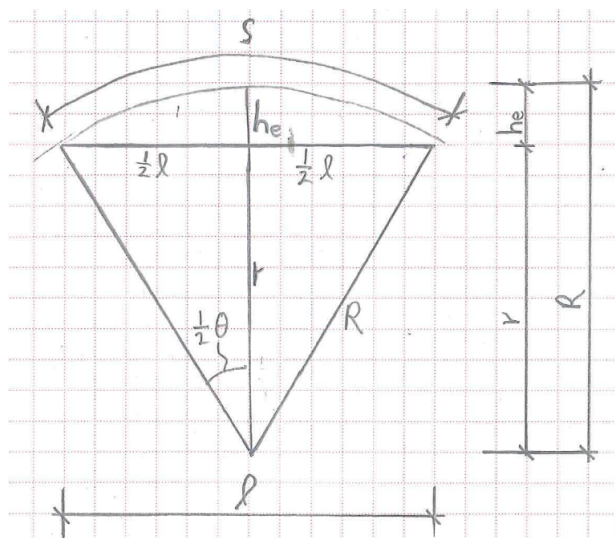
KROMMING

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de kromming van de kokerligger en de gevolgen hiervan op de constructie. Eerst worden een aantal begrippen met betrekking tot kromming uitgewerkt. Dan wordt de plaatsing van de voorspankabels in formulevorm bepaald, waarna vanuit twee oogpunten de minimale straal bij een bepaalde breedte van de verticale balk wordt bepaald. De eerste bepaling geeft de minimale straal uit de maximale trekkracht die op de constructie kan plaatsvinden en de tweede bepaling geeft de minimale straal opdat er geen uittrekken plaatsvindt van de voorspankabel. Al deze bepalingen worden theoretische en parametrisch uitgewerkt. Met behulp van een excel model, aan de hand van deze theoretische bepaling, kan dan voor de variabele lijfbreedte de minimale boogstraal worden bepaald.

Om alles te verduidelijken zal er ook nog een complete voorbeeldberekening worden gegeven waarbij een situatie compleet wordt doorerekend.

3.1 BOOGLENGTE EN DE EXCENTRICITEIT

In het vorige hoofdstuk is vastgelegd dat de afstand van de brug 50 meter hart op hart is. De lengte tussen de opleggingen staat dus vast op 50 meter. In deze paragraaf wordt vanuit de lengte tussen de opleggingen (L) en een boogstraal (R) een uitdrukking gegeven voor de booglengte (S) en de excentriciteit (e) van de gekromde ligger.



Figuur 19: Goniometrie gekromde ligger

In figuur 19 is een goniometrische weergave van de ligger weer-
gegeven. In de figuur zijn de volgende eigenschappen af te lezen:

L = hart op hart lengte tussen de opleggingen

S = booglengte ligger tussen de opleggingen

R = boogstraal gekromde ligger

e = lengte excentriciteit gebogen gedeelte

r = lengte driehoek gedeelte

θ = booghoek gekromde ligger

De booghoek θ wordt bepaald volgens:

$$\sin\left(\frac{1}{2}\theta\right) = \frac{\frac{1}{2}L}{R}$$

$$\frac{1}{2}\theta = \sin^{-1}\left(\frac{\frac{1}{2}L}{R}\right)$$

$$\theta = 2 \sin^{-1}\left(\frac{\frac{1}{2}L}{R}\right) \quad (19)$$

De booglengte S wordt bepaald volgens:

$$S = R \times \theta \quad (20)$$

Als vergelijking 19 in vergelijking 20 wordt gevuld wordt de boog-
lengte S gegeven door:

$$S = R \times 2 \sin^{-1}\left(\frac{\frac{1}{2}L}{R}\right) \quad (21)$$

Naast de booglengte willen we ook de excentriciteit (e) van de
gebogen ligger uitdrukken in de boogstraal (R) en de hart op hart

afstand tussen de opleggingen (L). De excentriciteit (e) van de gekromde ligger wordt gegeven door:

$$e = R - r \quad (22)$$

Volgens pythagoras geldt er voor r :

$$r = \sqrt{R^2 - \left(\frac{1}{2}L\right)^2} \quad (23)$$

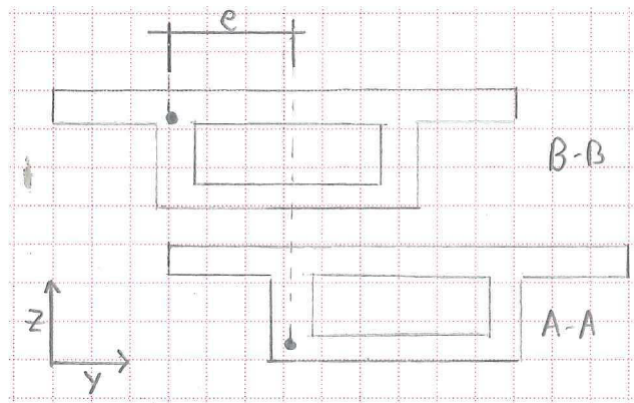
Vergelijking 23 kan worden ingevuld in vergelijking 22 zodat de excentriciteit wordt gegeven door:

$$e = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{1}{2}L\right)^2} \quad (24)$$

Nu de booglengte en de excentriciteit uitgedrukt zijn in R en L kunnen deze voor verschillende kromtestralen bepaald worden.

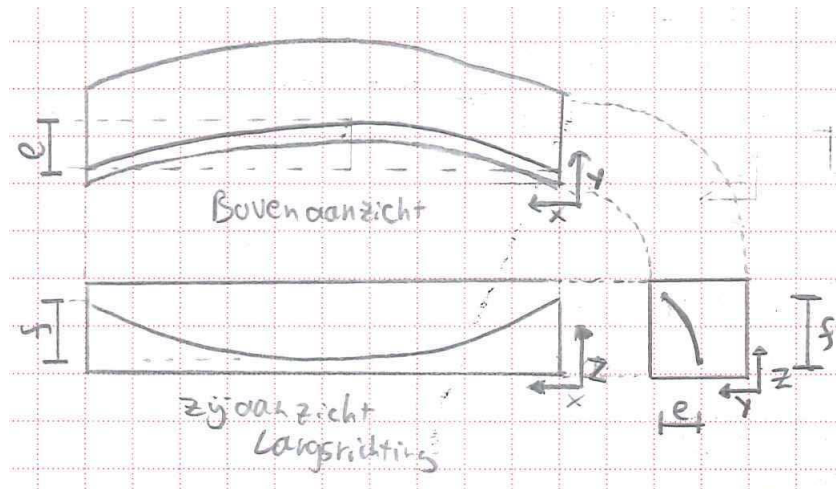
3.2 KRACHTENVERHOUDING VOORSPANKABELS

Door de kromming van de totale ligger, krommen de voorspankabels uiteraard mee. Door de kromming van de ligger hebben de voorspankabels niet alleen in verticale Z richting een excentriciteit in het midden, maar nu ook in de horizontale Y richting. De kabels liggen dus niet meer verticaal in het Y - Z vlak. Om toch de benodigde voorspankracht in verticale Z -richting te behouden zal er een grotere kracht op de voorspankabels moeten worden geuit.



Figuur 20: Excentriciteit positie AA en BB

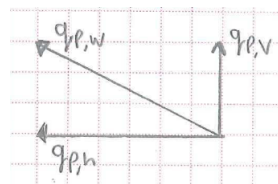
In figuur 20 zijn twee doorsnedes weergegeven met de positie van de fictieve voorspankabel. De posities A-A en B-B zijn te zien in figuur 16. De bovenste doorsnede bevindt zich aan het uiteinde van de ligger en de onderste doorsnede bevindt zich in het midden van de ligger. In deze figuur is duidelijk te zien dat door de kromming van de ligger de voorspankabel ook in horizontale richting een excentriciteit krijgt.



Figuur 21: Boven en zijaanzichten gekromde ligger

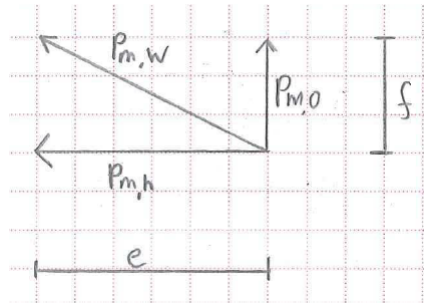
In figuur 21 zijn twee zij-aanzichten en een bovenaanzicht van de een schematiseerde gekromde ligger te zien. Deze geven een goed beeld van hoe de kabel precies in de constructie loopt.

Nu de kabel als het ware schuin in de constructie ligt, komen de daadwerkelijke drukspanningen vanuit de voorspanning op deze kabel ook in een hoek op de constructie terecht. De schuine werkelijke spanning ($q_{p,w}$) is weergegeven in figuur 22.



Figuur 22: Krommingsspanningen bij horizontaal gekromde ligger

In bovenstaande figuur is de daadwerkelijke schuine krommingsdruk weergegeven en opgesplitst in een verticale ($q_{p,v}$) en een horizontale ($q_{p,h}$) krommingsdruk. Hoe deze spanningen zich tot elkaar verhouden, wordt bepaald door de excentriciteit van de boogstraal (Y-as) en de pijl van de fictieve voorspankabel (Z-as) zoals uitgebeeld in de figuren hiervoor. De krachten in de kabels zorgen lineair voor de spanningen in de kabel en hebben dus ook dezelfde verhouding als de spanningen. De krachtenverhouding wordt dan gegeven volgens figuur 23:



Figuur 23: krachtenverhouding voorspankabel

De verticale voorspankracht ($P_{m,v}$) is bepaald uit de krachtwerking bij een rechte ligger en is dus bekend. De andere twee waarden kunnen bepaald worden met de verhouding van de twee excentriciteiten. Voor de horizontale voorspankracht geldt:

$$P_{m,h} = \frac{e}{f} \times P_{m,v} \quad (25)$$

En voor de totaal benodigde kracht in de kabels geldt:

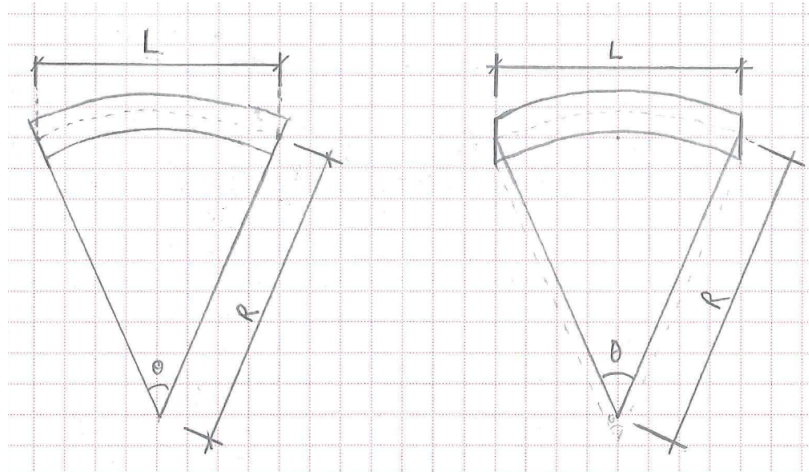
$$P_{m,w} = \frac{\sqrt{e^2 + f^2}}{f} \times P_{m,v} \quad (26)$$

Wat snel geconcludeerd kan worden is dat bij een grotere kromming, dus kleinere boogstraal, de werkelijke voorspanning in de kabel groter zal moeten zijn dan de voorspanning zou moeten zijn bij een rechte ligger. Ook wordt de horizontale voorspanning door een sterkere kromming steeds groter.

Het doel is om een vergelijking te krijgen voor de boogstraal uit de breedte van de verticale balk. Om dit voor elkaar te krijgen wordt er een versimpeld model gemaakt. Het model dat gebruikt wordt om dat te bepalen neemt aan dat de verticale voorspankracht, zoals hierboven vermeld, wordt verkregen uit de benodigde voorspankracht wanneer de ligger recht zou zijn. Deze verticale kracht is namelijk zo berekend dat deze minimaal de belastingen (indien de ligger recht is) kan opvangen.

3.2.1 Excentriciteit voorspankabel

In paragraaf 3.1 is uitgewerkt hoe de excentriciteit van een gekromde boog bij een bepaalde boogstraal wordt bepaald. Bij toepassing op de kokerligger is de logische aanname dat de boogstraal die gegeven wordt, geldt voor het midden van de ligger. Logischerwijs zou het zo zijn dat de totale breedte van de ligger op dezelfde manier wordt gebogen. Omdat de voorspankabels niet exact in het midden liggen, zou dit betekenen dat de voorspankabels een andere boogstraal en dus ook een andere excentriciteit dan het midden van de ligger hebben.



Figuur 24: Twee verschillende percepties van de gegeven boogstraal

Om eventueel overbodig rekenwerk te besparen wordt nu gekeken of voor de excentriciteit van de voorspankabels misschien de excentriciteit van het midden van de ligger aangenomen kan worden. De twee verschillende situaties zijn weergegeven in figuur 24. De linker schematisering geeft de werkelijkheid weer. Daarop is te zien dat buiten- en binnenzijde van de ligger een grotere en kleinere boogstraal hebben. De rechter schematisering geeft de vereenvoudigde situatie weer waarbij voor de complete ligger de zelfde boogstraal wordt aangenomen.

Voor de situatie van de kokerligger ligt de gemiddelde voorspankabel 1,5 meter van het midden van de ligger. De boogstraal van de voorspankabels wordt dus respectievelijk voor de binnenste kabels $R_{bi} = R - 1,5$ en voor de buitenste kabels $R_{bu} = R + 1,5$.

Het doel is om de excentriciteit van de verschillende boogstralen te vergelijken. Daarvoor dient eerst de excentriciteit in de boogstraal te worden uitgedrukt. Deze wordt gegeven volgens:

$$e = R \left(1 - \cos \frac{1}{2} \theta \right) \quad (27)$$

De booghoek blijft voor alle situaties gelijk en wordt gegeven volgens vergelijking 19. De boogstraal is dus de enige variabele. De de excentriciteit staat dus lineair in verband met de boogstraal. De excentriciteit van de binnenste (e_{bi}) en buitenste (e_{bu}) kabel staat in verhouding tot de excentriciteit van het midden (e) volgens:

$$e_{bi} = \frac{R - 1,5}{R} \times e$$

en

$$e_{bu} = \frac{R + 1,5}{R} \times e$$

Zoals verwacht blijkt dat bij grote waarde van R de verandering van de excentriciteit (e) kleiner wordt.

Uit vergelijking 25 blijkt dat de horizontale voorspankracht het grootst wordt indien de excentriciteit het grootst is. De excentriciteit in de buitenste kabel is dus maatgevend.

Voor een aangenomen boogstraal van 70 meter geldt een percentage verandering van $\frac{1,5}{70} = 2,14\%$ van de excentriciteit. Dit percentage is redelijk significant en kan dus niet zomaar verwaarloosd worden. Bij het rekenen met de boogstraal voor het midden van de ligger zou dus eigenlijk de boogstraal + 1,5 meter genomen moeten worden.

Om toch op een gemakkelijke manier door te kunnen gaan met het bepalen van de krachten in de voorspankabels en het bepalen van ponsgedrag, wordt ervan uitgegaan dat de boogstralen steeds gelden voor de maatgevende kabel. Er wordt dus niet gerekend met de boogstraal voor het midden van het wegdek, maar met een boogstraal van de buitenste kabel. Dit is mogelijk omdat uit voorgaande vergelijkingen blijkt dat de spanning in de binnenste kabel altijd kleiner is. Eigenlijk is dit dus een soort verkapte vorm van de eerder geschematiseerde situatie in figuur 24.

3.3 PLAATSING EN AANTAL VOORSPANKABELS

In deze paragraaf wordt gekeken hoeveel voorspankabels er maximaal kunnen worden geplaatst bij een bepaalde lijfbreedte. Door hier een vergelijking voor te geven kan voor elke breedte van de verticale balk het maximaal te plaatsen oppervlak aan voorspankabels worden bepaald. Dit wordt in het onderzoeksmodel gebruikt om de maximale trekkracht te bepalen.

Eerst wordt een uitdrukking gegeven voor de horizontale verdeling ofwel hoeveel kabels er naast elkaar kunnen liggen. Daarna wordt er gekeken naar de verticale verdeling. Deze verdeling heeft onder andere invloed op de gemiddelde pijl van de voorspankabels.

Bij de horizontale verdeling, wordt afhankelijk van de lijfbreedte, een uitdrukking gegeven voor het maximaal aantal kabels dat naast elkaar kan liggen en de betondikte laag tussen de maatgevende kabel en de buitenzijde.

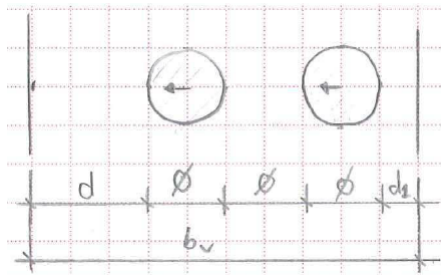
Hierbij wordt ervan uitgegaan dat de kabels zo worden geplaatst dat voor de uittrekkende maatgevende kabel de betondekking zo groot mogelijk is. Indien de kabel naar links wil worden uitgetrokken worden de kabels dus zo ver mogelijk rechts geplaatst. Door deze plaatsing komt het gezamenlijke zwaartepunt van de kabels niet op de normaalkrachtenlijn van de constructie te liggen en krijgt dus een excentriciteit.

Indien dit bij een rechte ligger zou gebeuren zou dit een extra moment in het horizontale vlak geven. Maar omdat er hier toch al naar een gekromde ligger wordt gekeken, welke al een moment/kromming in het horizontale vlak geeft, wordt dit effect niet meegenomen.

Als beginvergelijking voor de breedte van de verticale balk in relatie tot de betondikte wordt gegeven:

$$d_1 + \phi + \phi + \phi + d = b_v \rightarrow d = b_v - 3\phi - d_1$$

In deze vergelijking is d_1 de betondekking aan de kant waar de kabel er niet uitgetrokken wil worden. ϕ is de diameter van de gebruikte buis waar de voorspankabel in ligt. d is de dikte van de betondekking aan de kant waar de kabel er uitgetrokken wil worden en b_v is de totale lijfbreedte. In figuur 25 is dit ter verduidelijking weergegeven.



Figuur 25: Uitdrukking bij plaatsing van 2 kabels

De beginvergelijking is van toepassing als $b_v > 3\phi + 2d_1$. Er worden bij deze breedte 2 kabels naast elkaar toegepast. In de vergelijking is drie maal de diameter van de buis te vinden. Deze ontstaat doordat volgens de eurocode de minimale afstand tussen twee buizen minimaal de gebruikte buisdiameter moet zijn. Als blijkt dat $b_v > 5\phi + 2d_1$ is, dan is het mogelijk een extra buis bij te plaatsen. Telkens wanneer het mogelijk is een buis bij te plaatsen zodat aan de minimale afstand tussen de buisdiameters en de minimale betondekking wordt voldaan kan dit gebeuren. De complete uitwerking voor de modellering van alle lijfbreedtes is uitgewerkt in bijlage D.

Op een zelfde wijze is er een uitdrukking gegeven voor de pijl(f) afhankelijk van het aantal kabels dat boven elkaar wordt geplaatst in de verticale richting. Bij de verticale verdeling en de bepaling van de pijl is gekeken naar de plaatsing van 3 of 4 kabels boven elkaar. De plaatsing van 2 of 5 kabels boven elkaar is achterwegen gelaten omdat blijkt dat die aantallen niet voordelig zullen zijn om de minimale straal te verkrijgen. In paragraaf D.2 van bijlage D is de complete modelering van de verticale verdeling terug te vinden.

3.4 MINIMALE BOOGSTRAAL UIT MAXIMAAL VOORSPANOPPERVLAK

Uit figuur 23 is af te lezen dat de werkelijk benodigde kracht aan totale voorspanning groter wordt naarmate de excentriciteit groter

wordt en dus de boogstraal kleiner wordt. Deze verhouding heeft een maximum voor de constructie vanwege de maximaal toe te passen hoeveelheid voorspankabels. Het maximum aantal voorspankabels wordt bepaald aan de hand van de vergelijkingen in de vorige paragraaf. Het totale oppervlak van dit maximum maal de rekenkundige trekspanning van de voorspankabel geeft de maximale trekkracht die op de voorspankabels kan worden uitgevoerd.

In paragraaf 3.2 over de krachtenverhouding van de voorspankabels is al uiteengezet hoe de krachten in de gekromde constructie worden bepaald. Daarbij is ook vastgelegd dat de verticaal benodigde voorspankracht wordt bepaald uit het evenwicht van een rechte ligger. De verhouding van de pijl tot de excentriciteit bepaalt de werkelijke voorspanning. Om de minimale straal te verkrijgen wordt de maximale trekkracht aangenomen voor de werkelijke voorspanning. Vanuit deze verhouding kan dan de maximale excentriciteit worden bepaald welke de minimale boogstraal geeft.

Om de maximum excentriciteit te bepalen zijn de waardes voor vergelijking 26 om te schrijven naar:

$$e_{max} = \sqrt{\left(\frac{P_{m,w,max} \times f}{P_{m,0}}\right)^2 - f^2} \quad (28)$$

In deze vergelijking is te zien dat de maximale excentriciteit (e_{max}) wordt bepaald door de maximaal uit te oefenen kracht op de voorspankabels ($P_{m,w}$), de benodigde verticale kracht om de belastingen te kunnen dragen ($P_{m,0}$) en de gemiddelde pijl (f) van de voorspankabels.

De maximaal uit te oefenen kracht op de voorspankabels is afhankelijk van de hoeveelheid kabels die geplaatst (kunnen) worden. Het oppervlak van de maximale kabels ($A_{p,max}$) dient dan te worden vermenigvuldigd met de maximaal toelaatbare spanning van het gekozen voorspanstelsel (f_{pk}). In formulevorm:

$$P_{m,w,max} = A_{p,max} \times f_{pk} \quad (29)$$

De bijbehorende boogstraal kan bepaald worden door vergelijking 24 om te schrijven naar:

$$R_{min} = \frac{L^2}{8 e_{max}} - \frac{1}{2} e_{max} \quad (30)$$

Door de maximale excentriciteit in deze formule in te vullen verkrijgt men de minimale boogstraal van de ligger welke bepaald is uit de maximale trekspanning in de voorspankabels.

3.4.1 Controle werkelijke voorspankracht

In eerste instantie is er met een rechte ligger gerekend en daarvoor is de minimale voorspankracht bepaald. Deze voorspankracht is gecon-

troleerd opdat er op $t=0$ geen trekspanning in de bovenste vezel is en de maximale drukspanning in de onderste vezel niet wordt overschreden.

Zoals in de vorige paragrafen is gebleken, wordt door de kromming de kracht op de voorspankabels veel groter. Voor de nieuwe situatie, waarbij het complete oppervlak van alle voorspankabels volledig tot het maximum is aangetrokken, moet nu nogmaals worden gecontroleerd of aan deze eisen wordt voldaan.

Omdat er nu harder aan de kabels wordt getrokken dan in eerste instantie is gecontroleerd, kan ervan uit worden gegaan dat aan de eis, opdat er geen trekspanning in de bovenste vezel plaatsvindt op $t=0$, wordt voldaan.

Wat wel maatgevend zal zijn is de maximale betondrukspanning die mag plaatsvinden in de constructie. De maximale betondrukspanning wordt gegeven in vergelijking 16. De controle is of de drukspanning op $t=0$ in de onderste vezel van de constructie niet deze maximale betondrukspanning overschrijdt. Doordat er nu harder aan de kabels wordt getrokken, is de spanning uit de trekkracht groter geworden waardoor de druk toegenomen is. Er wordt harder aan de voorspankabel getrokken, maar dat levert in schuine richting een krommingsdrukspanning uit de voorspankabel op. In de Z-richting is dit nog steeds dezelfde waarde als voor de voorspanning benodigd bij een rechte ligger. Uiteraard is de belasting uit eigen gewicht die op $t=0$ aanwezig is gewoon hetzelfde. De controle formule wordt dan:

$$\sigma_{cb} = \frac{P_{m,w,max}}{A_c} + \frac{P_{m,0}(f - e_1)}{W_{cb}} - \frac{M_{t=0}}{W_{cb}} \leq \sigma_c \quad (31)$$

3.4.2 Maximale betondrukspanning

Indien de betondruk in de onderste vezel groter is dan de maximale betondrukspanning is de in vergelijking 30 minimale boogstraal uit het maximaal oppervlak niet maatgevend. Zodra dit gebeurt wordt de minimale boogstraal uit de maximale betondruk maatgevend. Deze maatgevende minimale boogstraal kan bepaald worden door de in vergelijking 28 gebruikte maximale uit te oefenen kracht op de voorspankabels $P_{m,w,max}$ te vervangen voor de maximaal uit te oefenen kracht op de voorspankabels vanuit de eis dat de betondruk niet overschreden wordt ($P_{m,c,max}$). Deze wordt bepaald door vergelijking 31 om te schrijven naar:

$$P_{m,c,max} < A_c \left(\sigma_c - \frac{P_{m,0} e_p}{W_{cb}} + \frac{M_{t=0}}{W_{cb}} \right) \quad (32)$$

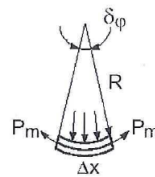
Door deze vernieuwde maximale voorspankracht in vergelijkingen 28 en 30 in te vullen wordt de daadwerkelijke minimale boogstraal gevonden.

3.5 MINIMALE BOOGSTRAAL UIT DIKTE BETONDEKKING

In paragraaf 3.2 is de verhouding van de horizontale spanning bepaald die door de gekromde voorspankabel ontstaat. De betonnen laag (incl. langswaopening) moet er voor zorgen dat deze voorspankabel niet uit de constructie wordt getrokken. In deze paragraaf wordt het gedrag van het uittrekken/uitponsen van de kabel omschreven. Bepaald wordt wat de weerstand van het beton is tegen uitdrukken bij deze constructie. Uiteindelijk wordt aan de hand van de breedte van de lijven een uitdrukking gegeven voor de minimale straal die toegepast kan worden.

3.5.1 Horizontale spanning voorspankabel

Bij voorspanning op een rechte ligger geeft de kracht in de voorspankabel een spanning over op het beton. Bij een gekromde ligger is gebleken dat er ook in horizontale richting een kracht ontstaat. Net zoals bij de berekeningen in alleen het verticale verband kan de horizontale kracht ook worden omgezet in een horizontale spanning.



Figuur 26: Schematisering van klein stuk kabel [5]

De horizontale drukspanning die vanuit de kabel ontstaat wordt bepaald uit de schematisering van een klein stuk kabel met lengte $R \times d\phi$ welke te zien is in figuur 26. Uit de evenwichtsvergelijking toegepast op dit stukje kabel volgt:

$$q_{p,h} \times R \times d\phi = P_{m,h} \times d\phi \rightarrow q_{p,h} = \frac{P_{m,h}}{R} \quad (33)$$

Daarbij is $P_{m,h}$ de horizontale kracht op een enkele kabel, q_p de horizontale spanning en R de boogstraal van de gekromde ligger.

De horizontale kracht in de kabel kan bepaald worden volgens vergelijking 25. Daarvoor is wel de verticale benodigde voorspankracht per kabel nodig welke wordt gegeven door:

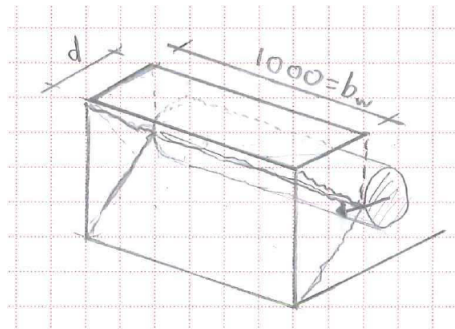
$$P_{m,v} = \frac{P_{m,0}}{n_{kabels}} \quad (34)$$

Daarin is $P_{m,0}$ de benodigde totale voorspankracht in de constructie op $t=0$ en n_{kabels} het aantal gebruikte kabels. Door vergelijking 25, 33 en 34 te combineren verkrijgt men voor de horizontale spanning vanuit de kabel:

$$q_p = \frac{\frac{e}{f} \times \frac{P_{m,0}}{n_{kabels}}}{R} \quad (35)$$

3.5.2 Uittrekcapaciteit betonlaag

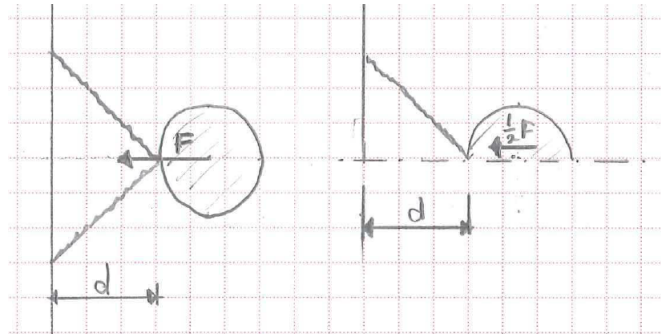
Om het uittrekgedrag te modelleren wordt er gerekend met de rekenformules volgens de afschuifcapaciteit uit EC2. De kracht op de voorspankabel wordt als een schuifkracht op de betonlaag gezien en zo ook gemodelleerd. De afschuiving wordt zo gemodelleerd dat deze de minimale situatie beschouwt. Om het zekere voor het onzekere te nemen wordt er dus met een scheurbreedte gerekend van de breedte van de betondeklaag (d) te zien in figuur 27.



Figuur 27: Scheurgedrag en modellering van kabel

Het is een conservatieve aanname dat de kabel op deze manier uitgetrokken wordt. In realiteit wordt de kabel pas uitgetrokken als de complete diameter van de kabel uit het beton getrokken wordt.

Aan de hand van de regels voor de afschuifcapaciteit wordt de uittrekcapaciteit van de betondeklaag bepaald. Omdat het hier gaat om twee afschuifvlakken, namelijk een aan de boven en een aan de onderkant van de kabel, zal de complete vergelijking maal twee moeten worden vermenigvuldigd. In figuur 28 is rechts de normale schematisatie van het afschuifvlak te zien. Links wordt de huidige situatie getoond. Uit deze figuur is ook af te leiden dat de vergelijking met twee vermenigvuldigd moet worden.



Figuur 28: Bepaling berekening met dubbele schuifkracht

Voor de maximaal opneembare schuifkracht V_{Rd} geldt:

$$V_{Rd} = \left[\frac{0,18}{y_c} k (100 \rho_l f_{ck})^{\frac{1}{3}} \right] b_w 2 d \quad (36)$$

Met een minimum waarde van:

$$V_{Rd} = v_{min} b_w 2 d \quad (37)$$

Waarin

$$v_{min} = 0,035 k^{\frac{3}{2}} \sqrt{f_{ck}} \quad (38)$$

Waarbij voor de karakteristiek k geldt:

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

In deze formules is d de betondeklaag bij de maatgevende voorspankabel. Deze wordt bepaald aan de hand van de lijfbreedte volgens de formules in paragraaf 3.3 en bijlage D.1.

Om gemakkelijk te rekenen wordt voor de breedte van de betondoorsnede (b_w) een waarde van 1 meter aangenomen. Bij het uittrekgedrag wordt dus een stuk kabel van 1 meter beschouwd.

Omdat de minimumwaarde de waarde is waarbij de minste schuifkracht opgenomen kan worden, is deze maatgevend. Voor de berekening wordt dus uitgegaan van vergelijking 37.

Opgemerkt moet worden dat in dit onderzoek er geen rekening is gehouden met de langswapening die eventueel in de constructie geplaatst moet worden. Wel is de verwachting dat er in het afschuifvlak van de voorspanbuis bijna geen langswapening geplaatst wordt omdat dit in de richting van de ligger geen normale wapeningsrichting is. Maar misschien is door deze aanname de constructie iets ondergedimensioneerd op het uittrekken van de voorspankabel. Daarentegen zal schuifwapening de capaciteit op uittrekken positief beïnvloeden.

3.5.3 Bepaling minimale straal

Om aan de maximale uittrekkcapaciteit te voldoen moet gelden dat:

$$V_{Rd} \geq V_{Ed} \quad (39)$$

De rekenkundige schuifkracht of uittrekkkracht (V_{Ed}) wordt gegeven door de in vergelijking 35 bepaalde horizontale spanning per meter te vermenigvuldigen met het beschouwde kabel deel van 1 meter. De rekenkundige schuifkracht wordt dan:

$$V_{Ed} = \frac{\frac{e}{f} \times \frac{P_{m,0}}{n_{kabels}}}{R} = \frac{e \times P_{m,0}}{f \times n_k \times R} \quad (40)$$

De minimale situatie die ontstaat als de maximaal opneembare schuifkracht gelijk is aan de rekenkundige schuifkracht, dus als $V_{Rd} = V_{Ed}$.

Door de maximaal opneembare schuifkracht in te vullen in de formule voor de kracht die op de voorspankabel werkt, wordt een vergelijking verkregen die omgeschreven kan worden naar een waarde voor de minimale straal. Dus nu geldt:

$$V_{Rd} \geq \frac{e \times P_{m,0}}{f \times n_k \times R}$$

Deze vergelijking kan om de minimale straal te verkrijgen in combinatie met vergelijking 24 worden omgeschreven naar onderstaande vergelijking. De precieze afleiding van deze formule is te vinden in bijlage E.1.

Voor de minimale straal bepaald uit de dikte van de betondeklaag geldt:

$$R_{min} \geq \sqrt{\frac{1}{\frac{4}{L^2} \left(1 - \left(1 - \frac{V_{Rd} \times f \times n_k}{P_{m,0}}\right)^2\right)}} \quad (41)$$

Door per situatie de pijl, het kabelprofiel, de benodigde voorspankracht op $t = 0$, de hart-op-hart lengte van de overbrugging en de rekenwaarde voor de maximaal opneembare schuifkracht in deze formule in te vullen kan dus uiteindelijk de minimale boogstraal worden bepaald.

Deze minimale boogstraal geeft aan hoe groot de boogstraal minimaal moet zijn bij een bepaalde breedte van de lijven, zodat de maatgevende voorspankabel niet uit de constructie wordt getrokken.

3.6 VOORBEELDBEREKENING

In het eerste deel van dit hoofdstuk is theoretisch uiteengezet hoe vanuit een bepaalde lijfbreedte de minimale kromming bepaald wordt. In

deze paragraaf wordt een voorbeeldberekening gedaan om de formules wat duidelijkheid te geven. Deze berekening wordt gedaan met de minimale lijfbreedte van 500 mm.

3.6.1 Beginwaarden

De waarden voor de doorsnede van de constructie worden dan::

Omschrijving	Waarde	Eenheid
Breedte bovenflens	6000	mm
Breedte onderflens	3500	mm
Totale hoogte	1800	mm
Hoogte bovenflens	400	mm
Hoogte onderflens	300	mm
Lijfbreedte	500	mm

Tabel 9: Doorsnede dimensies

Deze waarden geven de volgende doorsnede constante:

Omschrijving	Afkorting	Waarde	Eenheid
oppervlakte doorsnede	Ac	4,55	m^2
Normaalkrachten centrum z richting	Nc	1,084	m
Traagheidsmoment z richting	Izz	1,766	m^4
Weerstandsmoment boven	Wczt	2,467	m^3
Weerstandsmoment beneden	Wczb	1,629	m^3
Top kernpunt	Kczt	0,358	m
Bodem kernpunt	Kczb	0,555	m

Tabel 10: Doorsnede constante bij Bv is 500 mm

Het eigen gewicht van de constructie is $G = 10 \times 4,55 \times 2,5 = 113,75 \text{ kN/m}$ wat met een overspanning van 50 meter een moment uit alleen eigen gewicht geeft van:

$$M_{t=0} = \frac{1}{8} \times 113,75 \times 50^2 = 35547 \text{ kNm}$$

Het moment in BGT inclusief variabele en asfaltbelasting is:

$$M_{BGT} = \frac{1}{8} (Q + G_s + G) l^2 = \frac{1}{8} \times (36,78 + 33,54 + 113,75) \times 50^2 = 57520 \text{ kNm}$$

Zoals eerder gesteld wordt er gebruik gemaakt van het Dywidag voorspansysteem. Het gekozen systeem heeft buizen met een buitenste diameter van 138,4 mm waar 37 kabels in passen. Elke kabel heeft een oppervlakte van 140 mm^2 . De minimale betondekking is 40 mm.

Bij een breedte van 500 mm passen er 2 kabels naast elkaar in de verticale balk. De betondekking die dan nog overblijft om uittrekken te voorkomen is:

$$d = b_v - 3\phi - d_1 = 500 - 3 \times 138,4 - 40 = 44,8 \text{ mm}$$

Aan de hand van deze betondikte wordt de maximaal opneembare schuif/uittrekkkracht bepaald. Eerst wordt de karakteristiek (k) uitgerekend:

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} = 1 + \sqrt{\frac{200}{44,8}} = 3,112 \leq 2,0$$

Dus $k=2,0$. Nu kan de maximaal opneembare schuifkracht bepaald worden:

$$V_{Rd} = 0,035 k^{\frac{3}{2}} \sqrt{f_{ck}} b_w 2d = 0,035 \times 2^{\frac{3}{2}} \times \sqrt{55} \times 1000 \times 2 \times 44,8 = 65781 \text{ N} =$$

Dus de maximaal opneembare uittrekkkracht is 65,78 kN.

Nu wordt voor de verschillende situatie met 3 kabels en 4 kabels de minimale boogstraal bepaald.

3.6.2 3 Kabels boven elkaar

Eerst wordt de pijl van de voorspankabels bepaald:

Het onderste zwaartepunt (Z_{gb}) van de kabels in de verticale richting ligt op een afstand vanaf de onderkant gemeten van:

$$Z_{gb} = d_1 + 2,5\phi = 40 + 2,5 \times 138,4 = 386 = 386 \text{ mm}$$

Dit zwaartepunt zou ook voor het bovenste punt kunnen gelden als deze binnen het kernvlak valt. Dit wordt gecontroleerd door te kijken of geldt dat:

$$h_{tot} - Z_{gb} < N_c + K_{ct}$$

Voor deze situatie geldt:

$$1,800 - 0,386 < 1,084 + 0,359 = 1,414 < 1,443 \text{ m}$$

Het zwaartepunt valt dus binnen het kernoppervlak. Dit betekent dat voor het bovenste zwaartepunt de volgende vergelijking geldt:

$$Z_{gt} = h_{tot} - Z_{gb} = 1,800 - 0,386 = 1,414 \text{ m}$$

De pijl (f) wordt dan:

$$f = Z_{gt} - Z_{gb} = 1,414 - 0,344 = 1,028 \text{ m}$$

De excentriciteit waar met voorspanning mee gerekend wordt is:

$$e_p = N_c - Z_{gb} = 1,084 - 0,386 = 0,698 \text{ m}$$

De minimaal benodigde voorspankracht op $t = \infty$ wordt:

$$P_{m,\infty} \geq \frac{M_{BGT}}{\frac{W_{cb}}{A_c} + f} = \frac{57520}{\frac{1,629}{4,55} + 0,698} = 54465 \text{ kN}$$

De initiele voorspankracht is dan:

$$P_{m,0} = \frac{P_{m,\infty}}{0,8} = \frac{54465}{0,8} = 68081 \text{ kN}$$

Controle van de spanning in de bovenste vezel op $t=0$:

$$\sigma_{ct} = -\frac{P_{m,0}}{A_c} + \frac{P_{m,0} f}{W_{ct}} - \frac{M_{t=0}}{W_{ct}} = -\frac{68081}{4,55} + \frac{68081 \times 0,698}{2,467} - \frac{35547}{2,467} = -10107 \text{ kN/m}^2 < 0$$

Dus de tweede eis voldoet.

Voor de maximale betondrukspanning geldt:

$$\sigma_c = 0,6 f_{ck}(t) = 0,6 \times 55000 = 33000 \text{ kN/m}^2$$

Controle spanning onderste vezel op $t=0$

$$\sigma_{cb} = \frac{P_{m,0}}{A_c} + \frac{P_{m,0} f}{W_{cb}} - \frac{M_{t=0}}{W_{cb}} = \frac{68081}{4,55} + \frac{68081 \times 0,698}{1,629} - \frac{35547}{1,629} = 22316 < 33000 \text{ kN/m}^2$$

Dus de derde eis voldoet ook.

Met 3 kabels boven elkaar en 2 kabels naast elkaar per kant wordt het totaal aantal kabels in de constructie: $3 \times 2 \times 2 = 12$. De maximaal toepasbare kracht op dit aantal kabels is:

$$P_{m,w,max} = A_{p,max} \times f_{pk} = 12 \times 37 \times 140 \times 1395 = 86713200 \text{ N} = 86713 \text{ kN}$$

De maximum excentriciteit wordt dan:

$$e_{max} = \sqrt{\left(\frac{P_{m,w,max} \times f}{P_{m,0}}\right)^2 - f^2} = \sqrt{\left(\frac{86713 \times 1,028}{68081}\right)^2 - 1,028^2} = 0,811 \text{ m}$$

De bijbehorende minimale boogstraal vanuit het maximum oppervlak aan voorspankabels is dan:

$$R_{min} = \frac{50^2}{8 \times 0,811} - \frac{1}{2} \times 0,811 = 384,9 \text{ m}$$

Wel moet nog worden gecontroleerd of in deze situatie met de maximum trekkracht op de voorspankabels niet de betondrukspanning overschreden wordt. In de uiterste situatie blijkt dat:

$$\sigma_{cb} = \frac{86713}{4,55} + \frac{680810,698}{1,629} - \frac{35547}{1,629} = 26411 < 33000$$

De drukspanning in de onderste vezel is kleiner dan het maximum dus aan alle eisen wordt voldaan.

Nu wordt de minimale boogstraal bepaald uit de dikte van de betondeklaag van de maatgevende voorspankabel. Deze wordt gegeven door:

$$R_{min} = \sqrt{\frac{1}{\frac{4}{L^2} \left(1 - \left(1 - \frac{V_{Rd} \times f \times n_k}{P_{m,0}}\right)^2\right)}} = \sqrt{\frac{1}{\frac{4}{50^2} \left(1 - \left(1 - \frac{66,78 \times 1,028 \times 12}{68081}\right)^2\right)}} = 162,4 \text{ m}$$

De twee bepaalde minimumwaarden voor de boogstraal zijn nu 384,9 meter vanuit het oppervlak van de voorspankabels en 162,4 meter vanuit de betondeklaag. Hieruit is op te maken dat voor deze situatie de waarde uit de boogstraal vanuit het maximaal oppervlak dus maatgevend is. Om aan beide voorwaarden te voldoen moet de boogstraal minstens 384,9 meter zijn.

3.6.3 4 Kabels boven elkaar

Bovenstaande berekeningen zijn ook uitgevoerd in het geval dat er 4 kabels boven elkaar geplaatst zijn. Deze plaatsing heeft invloed op de pijl en het aantal kabels in de constructie en dus op alle daaropvolgende berekeningen. Indien dit doorgerekend wordt, komt er voor de minimale boogstraal uit de maximum kracht in de voorspankabel een lengte van 382,9 meter en voor de minimale boogstraal uit de betondeklaag een lengte van 176,4 meter. Voor deze situatie is dus ook de minimumwaarde vanuit het maximum voorspanoppervlak maatgevend met een waarde van 382,9 meter.

Nu beide situaties doorgerekend zijn kunnen deze vergeleken worden. Bij de plaatsing van 3 kabels boven elkaar is een minimale boogstraal van 384,9 meter gevonden en bij plaatsing van 4 kabels is een minimale boogstraal van 382,9 meter gevonden. Het is dus het voordeligste om bij een breedte van 500 mm van de verticale balk 4 kabels boven elkaar te plaatsen waardoor de minimale boogstraal 382,9 meter wordt.

3.7 TUSSENTIJDSE CONCLUSIES

Nu alle stappen om tot minimale boogstralen te komen zijn uiteengezet, kan er verder gekeken worden welke invloed bepaalde parameters hebben. Zoals uit de voorbeeld berekening al blijkt zijn de lengtes

van de minimale straal uit het oppervlak en uit de betondeklaag zeer verschillend van grote. Een goede optie is om te kijken hoe dit komt en wanneer deze waardes dicht bij elkaar in de buurt gaan liggen. In het volgende hoofdstuk is een parameterstudie uitgevoerd met de in de vorige hoofdstukken uitgezette formuleringen en bepalingen.

PARAMETERSTUDIE

In de voorgaande hoofdstukken is parametrisch uitgewerkt hoe vanuit twee oogpunten de minimale straal van een bepaalde constructie doorsnede bepaald kan worden. Om de parametrische uitwerking te verduidelijken is voor een situatie een voorbeeldberekening uitgewerkt. Doordat alle stappen parametrisch zijn uitgewerkt kan er nu een vergelijking gemaakt worden indien bepaalde parameters een verandering ondergaan. Dit onderzoek is uitgevoerd door de complete situatie in excel te verwerken. Vanuit de beginvoorwaarden is een excel sheet ontworpen die bij een enkele verandering van de parameter automatisch alles aanpast. Met behulp van deze sheet zijn een aantal parameters systematisch veranderd en is er gekeken in hoeverre dat de maximale kromming beïnvloed.

In dit hoofdstuk zullen een aantal parameters worden besproken. Per parameter zal gekeken worden wat een verandering voor invloed heeft en hoe deze zich relateert tot de minimale boogstraal uit de lijfbreedte. Indien nergens anders vermeld zijn de volgende uitgangswaarden voor de parameters gebruikt:

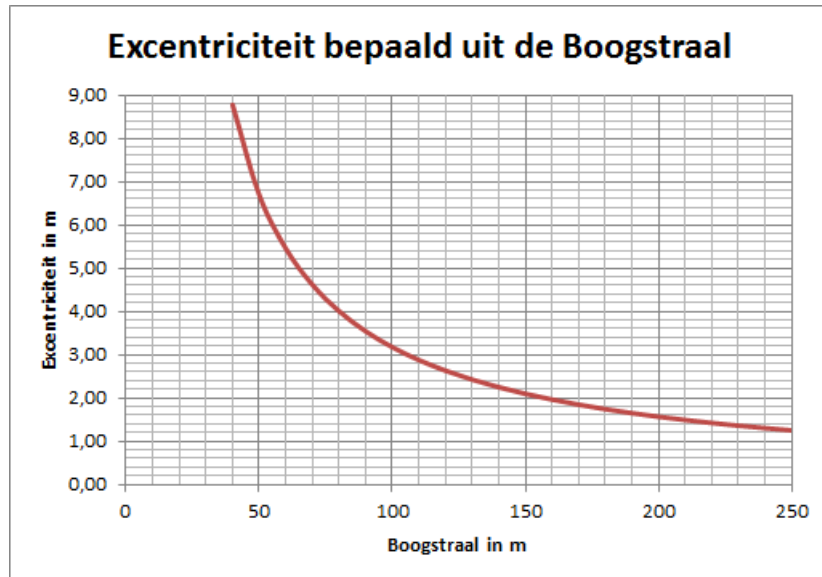
Omschrijving	Waarde	Eenheid
Breedte boven	6000	mm
Breedte beneden	$3000 + B_v$	mm
Totale hoogte	1800	mm
Hoogte bovenste balk	400	mm
Hoogte onderste balk	300	mm
Breedte verticale balk	B_v	mm
Lengte overspanning	50	m
Diameter voorspanbuis	138,4	mm
Aantal strengen voorspanbuis	37	mm
Minimale betondekking	40	mm

Tabel 11: Uitgangswaarden voor de parameters

4.1 BOOGSTRAAL

In de parameterstudie wordt onderzocht wat de invloed is van de variabelen op de minimale boogstraal. Uit de hierna te benoemen pa-

rameters wordt een verband gezocht tussen de (minimale) boogstraal en de lijfbreedte van de kokerligger. Maar om een goed beeld te krijgen van wat de boogstraal precies doet met de constructie, wordt in deze paragraaf voor een aantal verschillende boogstralen de excentriciteit bepaald volgens formule 24. Daarbij heeft de hart op hart afstand (L) een vaste waarde van 50 meter. Het resultaat is te zien in figuur 29



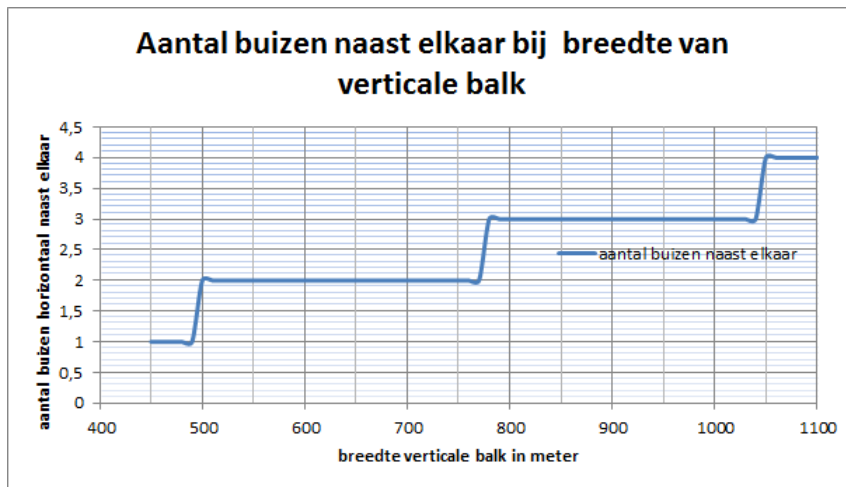
Figuur 29: Excentriciteit uit boogstraal bij $L=50$

In de grafiek is goed te zien dat de excentriciteit snel groter wordt naarmate de boogstraal de lengte van de hart-op-hart overspanning nadert. Zoals eerder uitgelegd, is de excentriciteit van invloed op de verhouding tussen de horizontale en verticale kracht uit de voorspankabel. Indien de pijl (f) op één meter wordt genomen kan bovenstaande grafiek ook gelden als de directe verhouding tussen horizontale (q_{ph}) en verticale spanning (q_{pv}) in de voorspankabel. Indien de boogstraal dus kleiner wordt, neemt deze verhouding erg snel toe wat tot gevolg heeft dat de horizontale spanning in de voorspankabel extreem groot wordt ten opzichte van de verticale spanning. Dit is voornamelijk van belang voor de bepaling van de minimale straal uit de betondekking van de voorspankabel.

4.2 AANTAL BUIZEN NAAST ELKAAR

In paragraaf 3.3 en bijlage D.1 is een uitdrukking gegeven voor de horizontale verdeling van de voorspankabels. Deze uitdrukking kan worden omgezet naar een grafiek voor de bepaling van het maximaal aantal buizen dat naast elkaar geplaatst kan worden bij een bepaalde lijfbreedte. In paragraaf 2.6.4 is gesteld dat wordt uitgegaan van een

buisdiameter van 138,4 mm en een betondekking van 40 mm. De grafiek die dit oplevert is te zien in figuur 30.



Figuur 30: Aantal buizen bij verschillende lijfbreedte

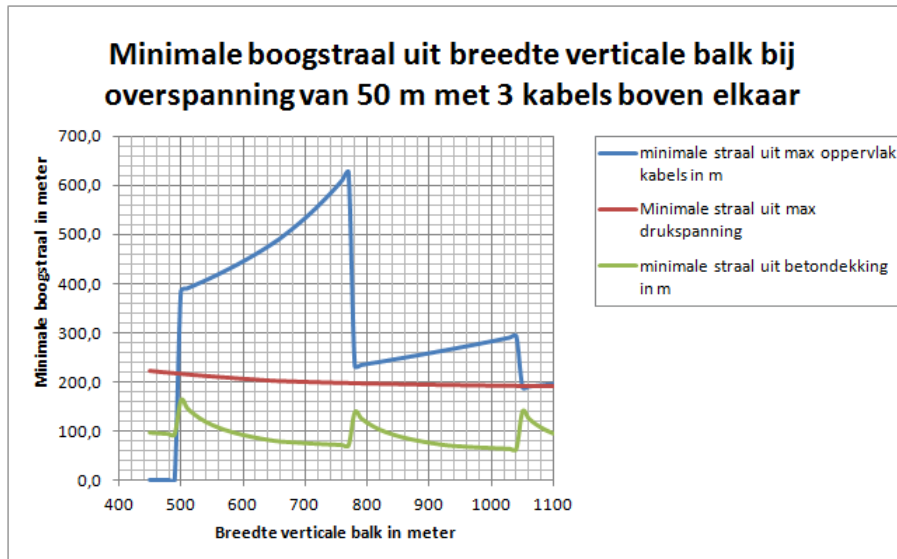
In deze figuur zijn drie abrupte verplaatsingen van de lijn te zien. Deze verplaatsing vindt plaats op het moment dat er een extra buis bijgeplaatst kan worden. Er wordt een buis bijgeplaatst indien de betondekking groter wordt dan twee buisdiameters plus de minimale betondekking. De waarde van de omslagpunten zijn respectievelijk 495 mm, 772 mm en 1049 mm. Deze maximale plaatsing van buizen naast elkaar is van belang voor bepaling van de minimale straal uit de maximale oppervlak van het te plaatsen voorspanstaal.

4.3 AANTAL BUIZEN BOVEN ELKAAR

In paragraaf 3.3 en bijlage D.2 zijn uitdrukkingen gegeven om de pijl te bepalen aan de hand van het aantal boven elkaar geplaatste buizen. In de theorie is steeds onderscheid gemaakt tussen de optie waarbij er drie kabels boven elkaar worden geplaatst en de optie waarbij er vier kabels boven elkaar worden geplaatst. In deze paragraaf zullen deze twee opties met elkaar worden vergeleken.

Om een vergelijking tussen deze twee opties te maken zal voor beide opties de minimale boogstraal uit de verschillende voorwaarden bepaald worden. Eerst wordt er gekeken naar wat er gebeurt bij een positionering van 3 kabels boven elkaar.

De hart-op-hart overspanning ligt vast op 50 meter en voor de afmetingen worden de uitgangswaarden gebruikt. De breedte van de lijven varieert tussen de 500 en 1100 mm. In grafiek 31 worden drie lijnen weergegeven.



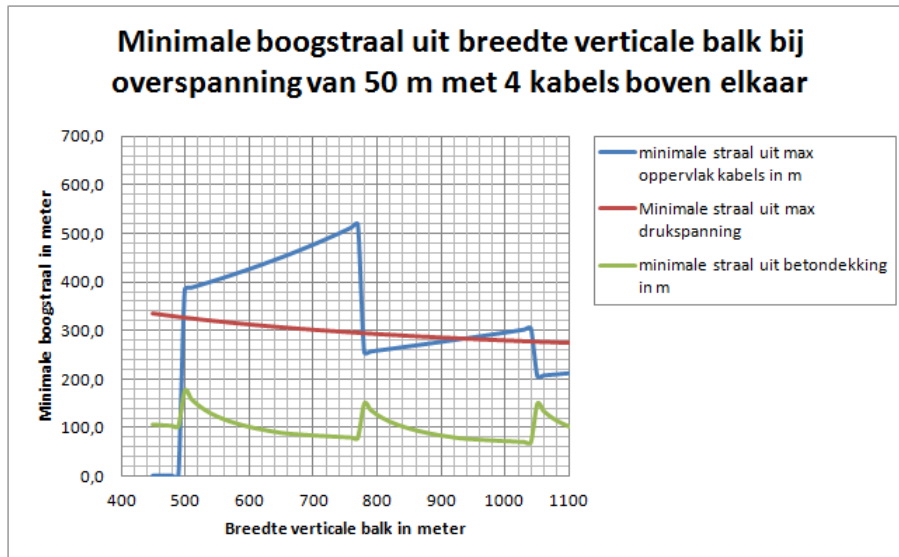
Figuur 31: Minimale boogstraal voor aantal eisen met 3 kabels boven elkaar

De blauwe lijn geeft de minimale boogstraal uit het maximaal voorspanoppervlak. De rode lijn geeft de minimale boogstraal uit de maximale betondruk. Het is al snel duidelijk dat de blauwe lijn overal maatgevend is behalve net na het punt van de laatste verspringing. Kennelijk wordt daar de drukspanning van het beton overschreden en moet de minimale boogstraal worden bijgesteld. Naast de blauwe en de rode lijn is er nog de derde groene lijn met de minimale straal uit de betondekking. Deze lijn komt nergens boven de andere twee lijnen uit. De dikte van de betondekking is dus in geen enkele situatie in zoverre relevant dat deze de minimale boogstraal bepaalt.

In de grafiek is bij twee van de drie lijnen goed te zien dat er een verspringing plaats vindt op het moment dat er in het horizontaal vlak meer kabels in de constructie passen. Voor de lijn van de minimale straal uit het maximaal oppervlak van de kabels is telkens een stijgende lijn te zien totdat er meer kabels naast elkaar geplaatst kunnen worden. Dit komt doordat de maximale oppervlakte van de voorspankabels gelijk blijft, maar ondertussen de moment die de constructie moet opnemen groter worden.

Voor de minimale straal uit de betondekking is dit juist andersom. Daar is een dalende lijn te zien die omhoog springt bij plaatsing van een extra kabel. Naarmate het lijf breder wordt, wordt de betondekking groter waardoor de kabel dus op een later moment wordt uitgetrokken. Zodra er weer een kabel bij wordt geplaatst is de betondekking weer op zijn dunst waardoor de minimale straal weer groter wordt.

Indien er 4 kabels boven elkaar worden geplaatst is een zelfde grafiek te produceren welke weergegeven is in figuur 32.

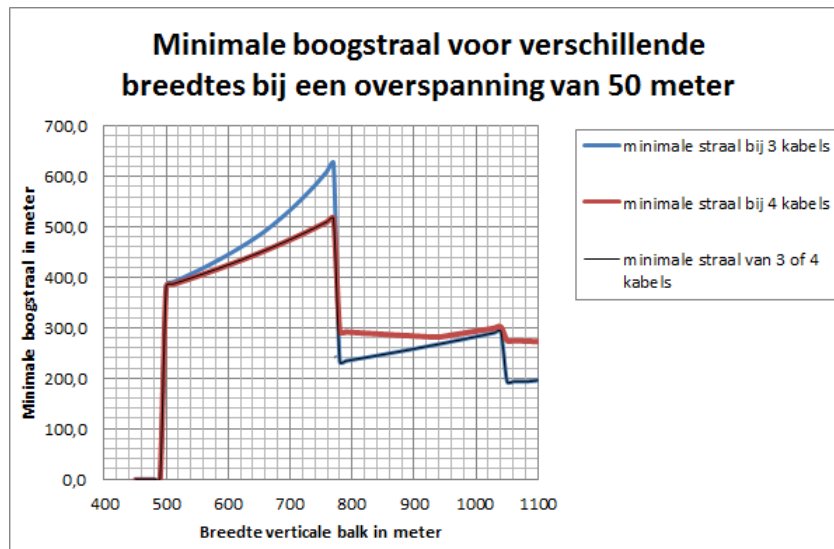


Figuur 32: Minimale boogstraal voor aantal eisen met 4 kabels boven elkaar

In deze grafiek is te zien dat weer voornamelijk de minimale boogstraal uit de maximale voorspanning maatgevend is, maar voor een aantal punten geldt dit niet. Daar is de minimale straal uit de maximale drukspanning die de constructie kan hebben maatgevend. In die situatie wordt bij het toepassen van de maximale straal uit de maximale voorspanning, de drukspanning overschreden en dus geldt er een andere maatgevende minimale straal. Ook in deze grafiek bevindt de minimale straal uit de betondekking zich weer compleet onder beide andere minima.

Wat opvalt is dat bovenstaande grafiek vergeleken met grafiek 31 een veel lagere piek heeft. Verder blijkt dat voor beide grafieken de straal uit de betondekking geen rol speelt. Een eerste gedachte is dat dit waarschijnlijk aan de grote overspanning ligt. In de volgende paragraaf zal hier verder op in worden gegaan.

Voor de opties met 3 kabels en met 4 kabels zijn per situatie de maatgevende maximale waarden te bepalen. Het minimum van een van beide maximale waarde geeft de daadwerkelijke minimale boogstraal bij een bepaalde lijfbreedte. De maximale waarde van 3 en 4 kabels en het minimum van deze twee is terug te vinden in figuur 33.



Figuur 33: Minimale boogstraal bij overspanning 50 meter

Uit de maxima van de optie met 3 kabels en met 4 kabels kan een minimum worden gezocht. Deze is aangegeven met een zwarte dunne lijn. Deze lijn geeft dus aan bij welke breedte welke minimale straal kan worden toegepast, of andersom.

Uit deze grafiek is af te leiden dat de lijn die de minimum waarde van de vier kabels weergeeft maatgevend is voor de breedtes tussen 500 mm en 772 mm en dat de lijn die de minimum waarde van de drie kabels weergeeft maatgevend is voor de breedtes tussen 772 en 1100 mm. De plaatsing van vier kabels boven elkaar is dus voordeliger op het moment dat er twee kabels horizontaal naast elkaar passen. Kennelijk levert op dat moment het extra voorspanoppervlak meer voordeel op dan de kleinere pijl. Indien er drie of vier kabels horizontaal naast elkaar geplaatst kunnen worden is juist de plaatsing van drie kabels boven elkaar voordeliger. Kennelijk wordt voor die situatie, op het moment dat er vier buizen boven elkaar worden geplaatst, de pijl zoveel kleiner dat dit té veel invloed heeft op de voorspankrachten en dus ook op de minimale straal.

Om er zeker van te zijn dat niks over het hoofd wordt gezien is er ook nog een korte berekening gemaakt met twee kabels boven elkaar en met vijf kabels boven elkaar in de verticale richting. Bij beide aanpassingen bleek al snel dat de waardes voor de boogstraal gigantisch groot of ongeldig werden. Voor de optie met twee kabels kwam dit omdat er dan niet genoeg voorspanoppervlak in de constructie aanwezig was waardoor de voorspankabels de belasting niet konden dragen en bij de optie met vijf kabels boven elkaar werd de gemiddelde pijl van de voorspankabels veel te klein. De constructie kon het nog wel aan, maar tegelijkertijd werden de minimale waarden van

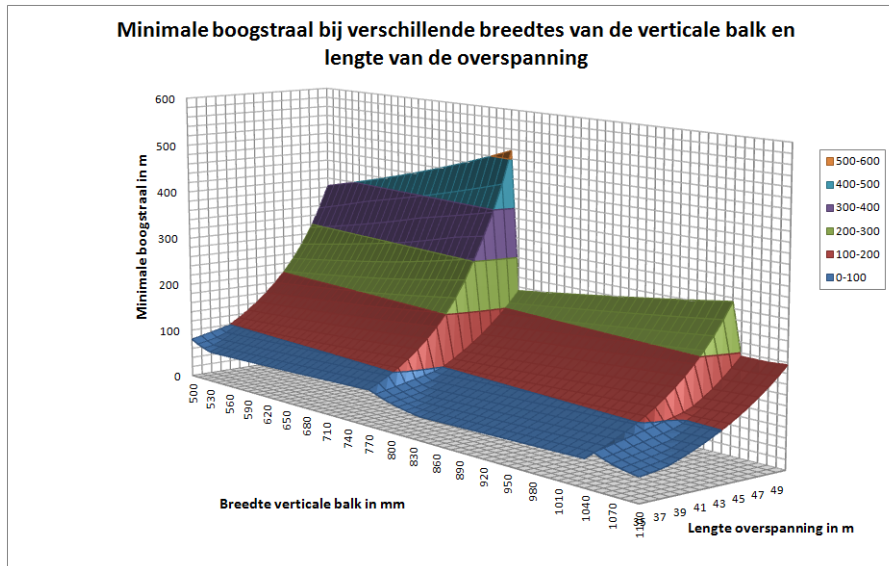
de boogstraal extreem groot, waardoor het resultaat minder relevant was voor dit onderzoek.

4.4 OVERSPANNING

Voor de voorgaande vergelijkingen en situaties is steeds een overspanning van 50 meter aangenomen. Zoals al bleek uit de voorbeeldberekening in paragraaf 3.6 en uit de vorige paragraaf wordt bij die overspanning de minimale straal vrij groot. Als doel van dit onderzoek is gesteld dat er naar kleine krommingsstralen gekeken zal worden. Vanuit verkeerstechnisch oogpunt, is in paragraaf 2.1 gebleken dat een straal van 70 meter de minimale benodigde straal is. Deze kromtestraal kan, zoals uit de eerdere analyse blijkt, voor het gekozen kokerprofiel niet bepaald worden bij een overspanning van 50 m. De kromtestraal kan echter nog wel kleiner worden als de overspanning kleiner wordt.

Daarnaast werd in de vorige paragraaf ook duidelijk dat de minimale straal uit de maximaal te plaatsen voorspankabel maatgevend is. De vraag is nu bij wat voor overspanning de minimale straal uit de betondekking ongeveer even groot wordt als de minimale straal uit het maximaal voorspanoppervlak.

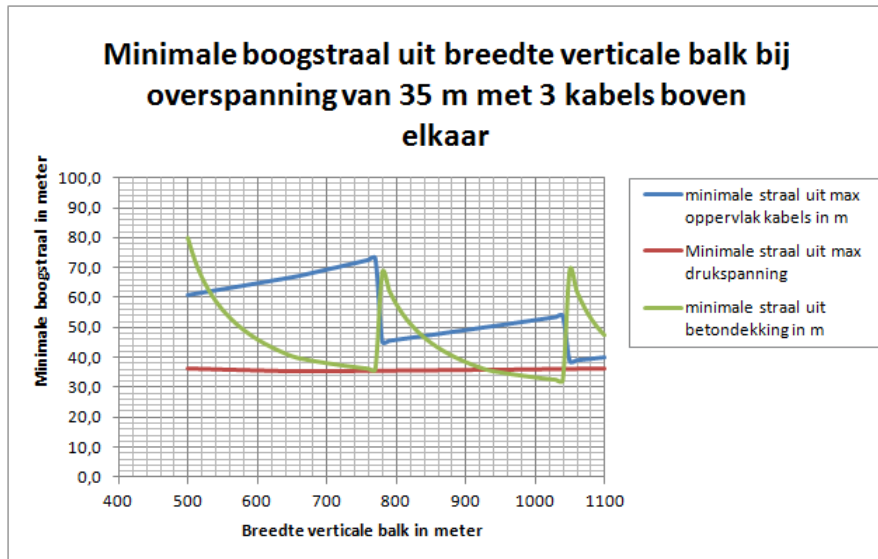
Om te kijken bij welke spanning de twee minimale waarden uit de straal elkaar naderen en om te kijken bij welke overspanning de minimale straal de 70 meter nadert, is een grafiek gemaakt met een variatie van de overspanning tussen 35 en 50 meter. In deze drie dimensionale grafiek zijn de overspanning tegen de minimale boogstraal en de breedte van de verticale balk uitgezet. Dit is te zien in figuur 34.



Figuur 34: Minimale boogstraal bij verschillende lijfbreedtes en overspanningen

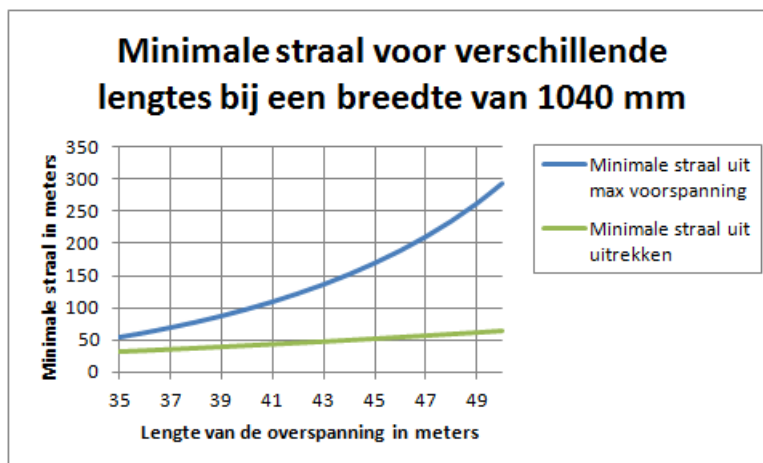
Aan de hand van deze grafiek is goed te zien wat de overspanning doet met de minimale boogstraal die de gekromde kokerligger dient te hebben. Helemaal aan de rechterzijde van de grafiek is de in eerste instantie aangenomen 50 meter terug te vinden welke een grote piek heeft in vergelijking tot de kortere overspanningen.

In de grafiek zijn ook weer de verspringingspunten terug te vinden. Wat op valt, is dat hoe korter de overspanning wordt, hoe meer deze verspringingspunten worden afgevlakt. Dit wil dus zeggen dat bij kortere overspanningen de minimale boogstraal uit de betondeklaag maatgevender wordt dan de maximaal toepasbaar voorspankracht. Dit is goed te zien in figuur 35. In deze figuur is de minimale straal bij plaatsing van 3 kabels boven elkaar en een overspanning van 35 meter te zien.

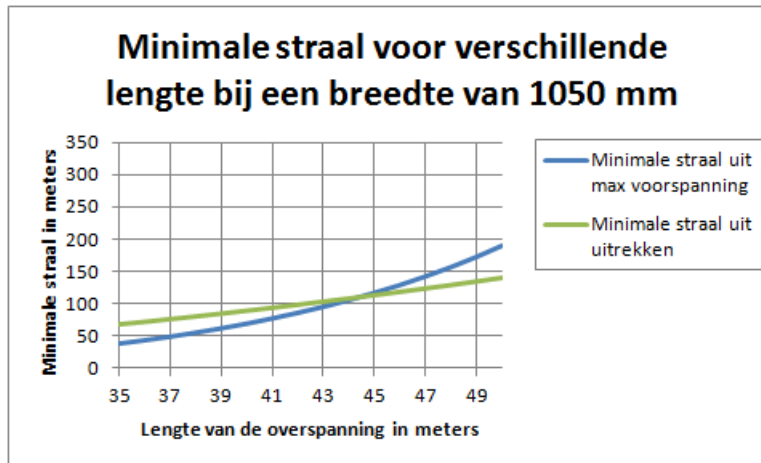


Figuur 35: Minimale boogstraal met overspanning 35(m)

Bij deze veel kortere overspanning is duidelijk te zien dat de grafiek voor de minimale straal uit de betondekking en de grafiek voor de minimale straal uit de maximum voorspankracht elkaar op een aantal punten kruisen. De minimale straal uit de betondekking is maatgevend net na het moment dat er een extra kabel bij geplaatst kan worden. Op dat moment is de betondeklaag op zijn dunst en blijkt de minimale straal uit het maximaal voorspanoppervlak kleiner te zijn. Deze verandering van de maatgevende eis kan goed geïllustreerd worden aan de hand van de volgende twee grafieken:



Figuur 36: Minimale boogstraal voor lengte bij lijfbreedte 1040 mm



Figuur 37: Minimale boogstraal voor lengte bij lijfbreedte 1050 mm

In figuur 36 is de minimale boogstraal voor verschillende lengtes van de overspanning te zien bij een vaste lijfbreedte van 1040 mm. Deze breedte is net kleiner dan de breedte waarbij er een extra voorspanbuis in de horizontale richting bijgeplaatst kan worden.

In figuur 37 is de minimale boogstraal voor verschillende lengtes van de overspanning te zien bij een vaste lijfbreedte van 1050 mm. Deze breedte is net iets groter dan de breedte waarbij er een extra voorspanbuis in de horizontale richting bijgeplaatst kan worden.

Als de twee figuren vergeleken worden is duidelijk te zien dat de blauwe lijn een flinke sprong naar beneden maakt en dat de groene lijn maar met mindere mate iets groter is geworden. Het naar beneden verschuiven van de blauwe lijn heeft, zoals eerder ook al uitgelegd, te maken met het extra voorspanoppervlak wat beschikbaar komt. Ook is al eerder uitgelegd dat de kleine verschuiving omhoog van de groene lijn komt doordat de dekking minder groot wordt door de plaatsing van de extra buis.

Wat nog meer op valt is dat in de bovenste figuur de lijnen elkaar niet kruisen, terwijl dat in de onderste figuur wel gebeurt. Net voor de verspringing is dus de minimale straal uit het maximale voorspanoppervlak voor elke lengte maatgevend, terwijl dat net na de verspringing niet het geval is. Na de verspringing is het zo dat vanaf een bepaalde lengte de minimale straal vanuit de betondekking maatgevend wordt.

In de grafiek in figuur 37 ligt het snijpunt van de twee lijnen bij een lengte voor de overspanning van 44,5 meter en een minimale boogstraal van 111,5 meter. De conclusie die hieruit getrokken kan worden is dat bij een lijfbreedte van 1050 mm en een overspanning van 44,5 meter de minimale boogstraal uit de maximale trekspanning en de minimale boogstraal uit de betondekking precies gelijk zijn. Als

de lengte korter wordt dan 44,5 meter is dus de minimale boogstraal uit de betondeklaag maatgevend.

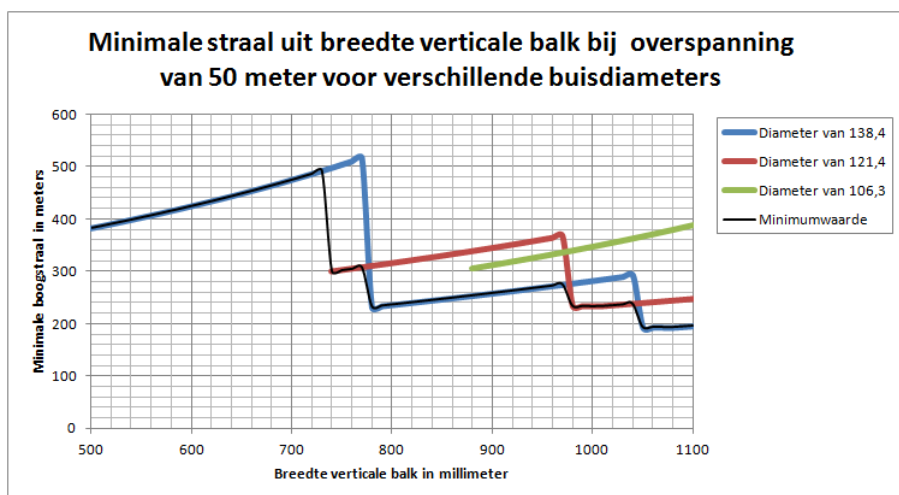
4.5 BUISDIAMETER

In hoofdstuk 2 paragraaf 2.6.4 is, vanuit het oogpunt van een rechte ligger, voor het gemak vastgelegd dat de grootste buisdiameter van 138,4 mm voor alle situaties gebruikt wordt.

Omdat ondertussen een theorie is uitgewerkt voor de berekening van de gekromde ligger wordt in deze paragraaf nogmaals gekeken of een eventuele andere buisdiameter voor bepaalde breedtes van de vlijven een betere keuze zou zijn met betrekking tot de minimale boogstraal.

Met een andere buisdiameter zal het maximaal oppervlak veranderen en dus ook andere boogstralen geven vanuit de het maximaal oppervlak. Daarnaast zullen bij een kleinere buisdiameter de punten veranderen waarop er een extra buis bijgeplaatst kan worden. De minimale boogstraal uit de betondeklaag zal dus bij andere breedtes maatgevend worden.

Om dit effect te onderzoeken is voor een vaste lengte van 50 meter onderzocht wat de minimale straal wordt indien er een buisdiameter van 138,4 mm, 121,4 mm of 106,3 mm wordt toegepast. Daarbij is de minimale straal bepaald uit de twee opties dat er 3 of 4 buizen boven elkaar geplaatst worden. Het resultaat van deze vergelijking is te zien in figuur 38.



Figuur 38: Minimale boogstraal vanuit verschillende diameters bij een overspanning van 50 m

In deze grafiek zijn vier lijnen te zien. De blauwe, de rode en de groene lijn geven de minimum waarde indien er een boogstraal van respectievelijk 138,4 mm, 121,4 en 106,3 mm wordt toegepast. De zwarte lijn geeft de minimum waarde van de drie lijnen tezamen weer.

Wat opvalt is dat de blauwe lijn de hele grafiek beslaat, maar dat de rode en de groene lijn pas vanaf een bepaalde breedte een punt in de grafiek geven. Bij waardes kleiner dan die specifieke breedte is er geen waarde mogelijk. Dit komt onder meer omdat er voor waardes kleiner dan die specifieke breedte er niet genoeg voorspankabels geplaatst kunnen worden om de voorspankracht op te nemen. De lijnen beginnen dan ook precies op specifiek verspringingspunt waarbij er net weer een kabel extra geplaatst kan worden.

Indien er toch resultaten willen worden bepaald bij kleinere diameters van 121,4 mm en 106,3 mm, kan eventueel de totale hoogte van de constructie worden vergroot. Zodat de pijl van de voorspankabels toeneemt en er een grotere krommingsdrukspanning uit de voorspankabels ontstaat.

In de grafiek is tevens te zien dat op een aantal punten de keuze voor een diameter van 121,4 een kleinere minimale straal geeft dan de in eerste instantie aangenomen 138,4 mm. Voor deze punten zou het dus voordeliger zijn om te kiezen voor de net wat kleinere diameter.

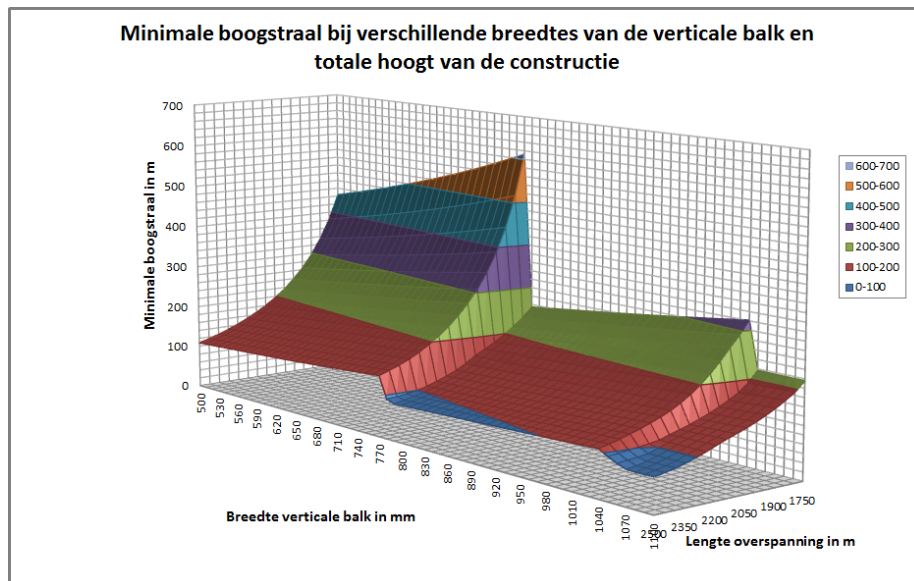
4.6 TOTALE HOOGTE

De totale hoogte is in hoofdstuk 2 vastgelegd op 1800 mm. Wel met de voorwaarde dat de grootste buisdiameter van 138,4 mm wordt toegepast en de breedte van de verticale balk minimaal 500 is.

Zoals uit de vorige paragraaf al bleek is het voor sommige situaties voordeliger om een minder grote buisdiameter te gebruiken zodat de er een kleinere boogstraal toegepast kan worden. In deze paragraaf wordt de mogelijkheid onderzocht of hetzelfde bereikt kan worden door de hoogte van de constructie te veranderen.

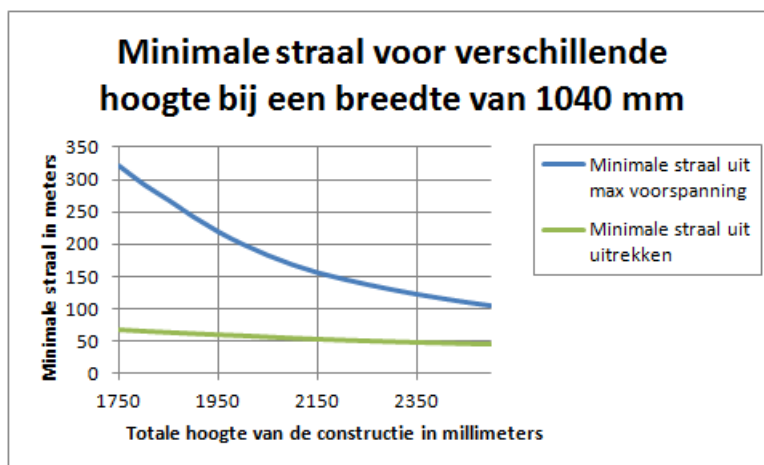
Het is immers zo dat als de totale hoogte wordt vergroot, dat de pijl van de voorspankabels vergroot. Deze pijl is van grote invloed op de minimale straal uit de maximale toe te passen voorspankracht en zoals eerder al is vastgesteld is deze bij een overspanning van 50 meter zeer maatgevend.

Met een constante overspanning van 50 meter, een veranderende totale hoogte van de constructie en een variabele lijfbreedte wordt figuur 39 verkregen.

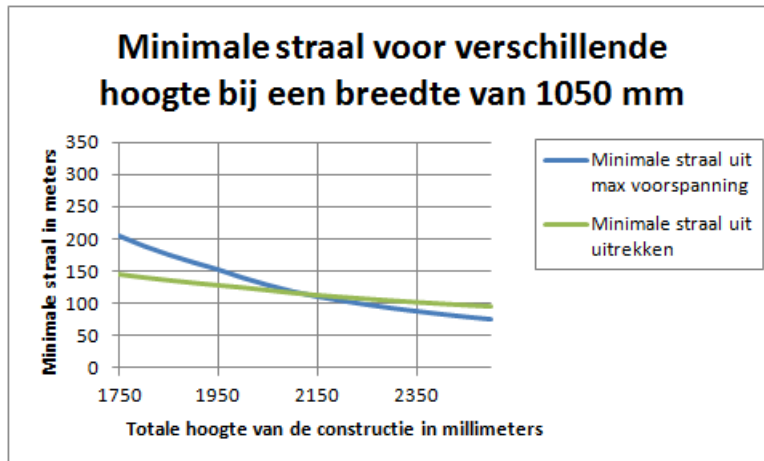


Figuur 39: Minimale boogstraal bij verschillende lijfbreedte en variabele hoogte

In deze 3D-grafiek is duidelijk te zien dat een vergroting van de hoogte van de constructie er toe leidt dat bij elke breedte de minimale toe te passen straal kleiner wordt. Wat opvalt is dat bij de grotere hoogtes langzamerhand de grafiek weer afvlakt. Dit betekent dat de minimale straal uit de betondekking voor die hoogtes maatgevender wordt. Netzoals bij de verschillende lengtes zal nu bij een breedte van 1040 mm net voor de verspringing en een breedte van 1050 mm net na de verspringing de minimale boogstraal uitgezet worden tegen de hoogte van de constructie.



Figuur 40: Minimale boogstraal voor verschillende hoogte bij 1040 mm lijfbreedte



Figuur 41: Minimale boogstraal voor verschillende hoogte bij 1050 mm lijfbreedte

In figuur 40 is weer duidelijk te zien dat de twee minima elkaar nauwelijks naderen. De minimale straal uit de maximale voorspanning is maatgevend voor elke onderzochte hoogte. In figuur 41 kruisen de twee minima elkaar wel. Uit de grafiek is op te maken dat vanaf een hoogte van 2130 mm de minimale straal uit de betondekking maatgevend wordt.

CONCLUSIES & AANBEVELINGEN

5.1 CONCLUSIES

In dit onderzoek is er gekeken naar de gevolgen van het krommen van voorgespannen kokerliggers. Wat snel naar voren kwam is dat bij het gebruik van voorspankabels die in het horizontale vlak een kromming meekrijgen deze een diagonale resultante krommingsdrukspanning opleveren in de constructie. Om hier mee te kunnen rekenen is deze schuine kracht opgedeeld in een horizontale en een verticale vector.

Vanuit het model voor afschuiving is een formule geformuleerd waarbij aan de hand van de betondeklaag, die zich voor de kabel bevindt, de minimale straal bepaald kan worden. Daarbij kwam naar voren dat voor redelijk kleine krommingen de kabels niet uit zouden spatten. Indien de juiste betonsterkte werd gekozen, leverde de deklaag in bijna alle situaties voldoende betondekking.

Wat tijdens dit proces naar voren kwam is dat de verhouding tussen de werkelijke diagonale kracht en de benodigde verticale kracht van veel groter belang was voor de maximale kromming. De verhouding van de excentriciteit van de ligger en de pijl van de voorspanning bleek een directe invloed op de krachtenverdeling in de voorspankabel te hebben. De daadwerkelijke minimale boogstraal werd bepaald via de benodigde verticale voorspankracht en de maximum trekspanning die kon worden uitgevoerd. De parameterstudie in paragraaf 4.3 toonde aan dat voor bepaalde situaties de minimale boogstraal uit de spanningen vele malen groter was dan die bepaald vanuit de betondekking.

Vanuit deze tussentijdse conclusie is een parametrische methode ontwikkeld om vanuit de variabele lijfbreedte de minimale boogstraal te bepalen. Uit deze methode zijn grafieken naar voren gekomen waarbij op de x-as de breedte van de lijven is uitgezet en op de y-as de minimale boogstraal. Met behulp van deze grafieken is het mogelijk om met een eventueel beoogde boogstraal de benodigde lijfbreedte te bepalen.

Zojuist is de tendens van het onderzoek gegeven. Naast deze algemene conclusies kan specifiek vanuit de parameterstudie worden geconcludeerd, dat als er een overspanning van 50 meter met een sterke kromming moeten worden uitgevoerd, dat dan de constructie een zeer grote breedte en/of hoogte moet hebben. Bij deze overspanning heeft het uittrekmechanisme, dat in eerste instantie onderzocht zou worden, geen enkele invloed. De grootste invloed op de minimale boogstraal heeft de maximale hoeveelheid te plaatsen voorspankabels. Pas bij een grote breedte, wanneer er meer voorspankabels geplaatst kunnen worden, en grote totale hoogte, wanneer de pijl groot genoeg is, kan er sterk gekromd worden. Pas dan blijkt de minimale boogstraal kleine waarden aan te nemen. De conclusie is dan dat het zo klein krommen bij deze constructie qua materialen en dus qua prijs erg kostbaar wordt.

Om te kijken voor welke lengte van de overspanning deze constructiedoorsnede wel geschikt zou zijn is een vergelijking tussen de overspanningen en de minimale boogstraal gemaakt. Daaruit blijkt dat voor kortere overspanningen (kleiner dan 40 meter) de voorbeeld constructiedoorsnede wel voldoet om een grotere kromming toe te passen. Het is dus gunstig om bij toenemende kromming de overspanning te verklijnen. Ook blijkt dat als de overspanning kleiner wordt het uittrekken van de voorspankabel uit de betondeklaag voor sommige breedtes wel maatgevend wordt.

Verder is een conclusie dat het aantal kabels en de plaatsing daarvan van grote invloed is op de boogstraal die op de ligger geplaatst kan worden. Verschillende aantallen en verschillende diameters zijn zeer bepalend voor de minimale boogstraal.

5.2 AANBEVELINGEN

In dit onderzoek is getracht door middel van de breedte van de lijven de minimale boogstraal te bepalen. In eerste instantie was het de bedoeling om dit te doen aan de hand van het uittrekgedrag van de kabels, maar later bleek dat de hoeveelheid voorspankabels maatgevender was. De aanbeveling is om bij een volgend onderzoek vanuit een vaste boogstraal en eventueel vaste doorsnede te werk te gaan. Dan kan er misschien preciezer in kaart worden gebracht wat er precies gebeurt in de constructiedoorsnede bij het sterk krommen van de ligger. Zo is het dan mogelijk om exacter de locatie van de voorspankabels mee te nemen en niet uit te gaan van het maximaal toepasbare voorspanoppervlak. Misschien dat het dan ook mogelijk is om vanuit de boogstraal de lijfbreedte te bepalen in plaats van het tegenovergestelde, wat in dit onderzoek is gedaan.

Wat dan ook beter uitgewerkt zou kunnen worden is de invloed van de extra benodigde voorspanning bij het krommen van de ligger. In dit onderzoek is aangenomen dat de voorspankracht in een gekromde ligger dezelfde verticale component ($P_{m,w}$) moest hebben als in een rechte ligger. De extra drukkracht die echter ontstaat op de betonconstructie, door de toename van de totale voorspankracht ($P_{m,w}$) vanwege de kromming, beïnvloedt de drukspanning. Dit is meegenomen in de controles voor de maximale drukspanning, maar beïnvloedt ook de minimaal vereiste voorspanning. De invloed van deze vereenvoudiging in de rekenmethode op de uitkomsten van dit onderzoek, moet nog onderzocht worden.

Daarnaast is er in dit onderzoek alleen gekeken naar het uittrekgedrag van één kabel maar in werkelijkheid zou het natuurlijk zo kunnen zijn dat de uittrekking van twee of meer kabels eerder zal plaatsvinden. Een aanbeveling is om het uittrekgedrag van een combinatie van voorspankabels nader te bekijken. Daarbij zal dan een bepaling moeten worden gemaakt voor het scheurgedrag dat plaatsvindt tussen de kabels in. Eventueel kan dan in plaats van met een afschuifprobleem, met de precieze karakteristieke treksterkte van beton worden gerekend. Dit vergt wel een andere modellering van het uittrekprobleem.

Ook is er bij de plaatsing van voorspankabels een te kleine schatting van de minimale betondekking gemaakt rond de uiteinde van de ligger. De pijl van de voorspankabels is waarschijnlijk overschat doordat er geen rekening is gehouden met de ruimte benodigd voor de ankerplaten. De invloed op de spanningen door een verbreding aan de uiteindes van de ligger door de plaatsing van ankerplaten moet nog nader worden onderzocht.

Tevens is nergens in dit onderzoek de invloed van betonwapening meegenomen in combinatie met de voorspanning op de constructie. Een goede optie zou zijn om te kijken wat de invloed van de wapening is in een gekromde ligger met voorspanning.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Commissie RONA (1991) *Richtlijnen Ontwerp Niet-Autosnelwegen*. Rijkswaterstaat: Staatsuitgeverij
- [2] Dywidag Post Tensioning Systems folder(2006)
Gebruikt in september 2013 via
http://www.dsiamerica.com/uploads/media/DSI-USA_Bonded-Post-Tensioning-Systems_us_01.pdf
- [3] Molenaar, A.A.A & Houben, L.J.M. (2011). *Collegedictaat Wegen en Spoorwegen*. Delft: TU Delft
- [4] Walraven, J.C. (2011). *Collegedictaat CT2052/3150; Gewapend Beton*. Delft: TU Delft
- [5] Walraven, J.C. (2011). *Collegedictaat CT3150/CT4160; Prestressed Concrete*. Delft: TU Delft
- [6] Hartsuiker, C. (2003). *Toegepaste mechanica deel 2: spanningen, vervormingen, verplaatsingen*. Sdu Uitgevers: Den Haag

LIJST VAN FIGUREN

Figuur 1	Gekromde kokerligger	9
Figuur 2	Rijbaanindeling (in mm)	10
Figuur 3	Specificaties voorspankabel [2]	12
Figuur 4	Specificaties voorspankoker [2]	12
Figuur 5	Plaatsing puntlasten Tandemstelsel	14
Figuur 6	Verdeelde belasting breedte wegdek	14
Figuur 7	Gemiddelde verdeelde belasting breedte wegdek voor de lengterichting	15
Figuur 8	Plaatsing extreme puntlasten locatie 2	16
Figuur 9	Dimensie aanduidingen doorsnede	17
Figuur 10	Mechanica schematisering bovenste balk	18
Figuur 11	Mechanica schematisering beneden balk	22
Figuur 12	Momentlijn met vergeet-me-nietjes	22
Figuur 13	Langsdoorsnede met pijl en excentriciteit	25
Figuur 14	Spanningsdiagrammen	26
Figuur 15	Dimensies doorsnede	29
Figuur 16	Doorsnede ligger in lengterichting	34
Figuur 17	Doorsnede A-A plaatsing voorspankabels	34
Figuur 18	Doorsnede B-B plaatsing voorspankabels	35
Figuur 19	Goniometrie gekromde ligger	38
Figuur 20	Excentriciteit positie AA en BB	39
Figuur 21	Boven en zijaanzichten gekromde ligger	40
Figuur 22	Krommingsspanningen bij horizontaal gekromde ligger	40
Figuur 23	krachtenverhouding voorspankabel	41
Figuur 24	Twee verschillende percepties van de gegeven boogstraal	42
Figuur 25	Uitdrukking bij plaatsing van 2 kabels	44
Figuur 26	Schematisering van klein stuk kabel [5]	47
Figuur 27	Scheurgedrag en modellering van kabel	48
Figuur 28	Bepaling berekening met dubbele schuifkracht	49
Figuur 29	Excentriciteit uit boogstraal bij L=50	58
Figuur 30	Aantal buizen bij verschillende lijfbreedte	59
Figuur 31	Minimale boogstraal voor aantal eisen met 3 kabels boven elkaar	60
Figuur 32	Minimale boogstraal voor aantal eisen met 4 kabels boven elkaar	61
Figuur 33	Minimale boogstraal bij overspanning 50 meter	62
Figuur 34	Minimale boogstraal bij verschillende lijfbreedtes en overspanningen	64

Figuur 35	Minimale boogstraal met overspanning 35(m)	65
Figuur 36	Minimale boogstraal voor lengte bij lijfbreedte 1040 mm	65
Figuur 37	Minimale boogstraal voor lengte bij lijfbreedte 1050 mm	66
Figuur 38	Minimale boogstraal vanuit verschillende diameters bij een overspanning van 50 m	67
Figuur 39	Minimale boogstraal bij verschillende lijfbreedte en variabele hoogte	69
Figuur 40	Minimale boogstraal voor verschillende hoogte bij 1040 mm lijfbreedte	69
Figuur 41	Minimale boogstraal voor verschillende hoogte bij 1050 mm lijfbreedte	70
Figuur 42	Doorsnede Kokerligger	85
Figuur 43	Afmetingen van de doorsnede	85
Figuur 44	Handberekening Oppervlakte Kokerdoorsnede	86
Figuur 45	Handberekening positie NC	86
Figuur 46	Handberekening traagheidsmoment in z-richting	87
Figuur 47	Handberekening traagheidsmoment in y-richting	88
Figuur 48	Moment en dwarskrachtlijn bij 2200 mm Combinatie 1 en Plaats 1	89
Figuur 49	Moment en dwarskrachtlijn bij 2200 mm Combinatie 1 en Plaats 2	89
Figuur 50	Moment en dwarskrachtlijn bij 2200 mm Combinatie 2 en Plaats 1	89
Figuur 51	Moment en dwarskrachtlijn bij 2200 mm Combinatie 2 en Plaats 2	90
Figuur 52	Moment en dwarskrachtlijn bij 2600 mm Combinatie 1 en Plaats 1	90
Figuur 53	Moment en dwarskrachtlijn bij 2600 mm Combinatie 1 en Plaats 2	90
Figuur 54	Moment en dwarskrachtlijn bij 2600 mm Combinatie 2 en Plaats 1	91
Figuur 55	Moment en dwarskrachtlijn bij 2600 mm Combinatie 2 en Plaats 2	91
Figuur 56	Moment en dwarskrachtlijn bij 3000 mm Combinatie 1 en Plaats 1	91
Figuur 57	Moment en dwarskrachtlijn bij 3000 mm Combinatie 1 en Plaats 2	92
Figuur 58	Moment en dwarskrachtlijn bij 3000 mm Combinatie 2 en Plaats 1	92
Figuur 59	Moment en dwarskrachtlijn bij 3000 mm Combinatie 2 en Plaats 2	92
Figuur 60	Moment en dwarskrachtlijn bij 3400 mm Combinatie 1 en Plaats 1	93

Figuur 61	Moment en dwarskrachtlijn bij 3400 mm Combinatie 1 en Plaats 2	93
Figuur 62	Moment en dwarskrachtlijn bij 3400 mm Combinatie 2 en Plaats 1	93
Figuur 63	Moment en dwarskrachtlijn bij 3400 mm Combinatie 2 en Plaats 2	94
Figuur 64	Doorsnede ligger in lengterichting	98
Figuur 65	Doorsnede A-A plaatsing voorspankabels	98
Figuur 66	Doorsnede B-B plaatsing voorspankabels	99
Figuur 67	Plaatsing kabels bij breedte van 500 mm	101
Figuur 68	Uitdrukking bij plaatsing van 2 kabels	104
Figuur 69	Uitdrukking bij plaatsing van 3 kabels	104
Figuur 70	Uitdrukking bij plaatsing van 4 kabels	105
Figuur 71	Bepaling verticaal zwaartepunt met 3 kabels	106
Figuur 72	Bepaling verticaal zwaartepunt met 4 kabels	106

LIJST VAN TABELLEN

Tabel 1	Waarden betonsterkteklasse C55/67	11
Tabel 2	Waarden staalsoort B500B	11
Tabel 3	Maximale Dwarskracht bij combinaties in kN	20
Tabel 4	Maximale Moment bij combinaties in kNm	20
Tabel 5	Vastgelegde dimensies	29
Tabel 6	Oppervlaktes combinaties	29
Tabel 7	Waarden standaard ontwerp	30
Tabel 8	Vastgestelde dimensies doorsnede	35
Tabel 9	Doorsnede dimensies	51
Tabel 10	Doorsnede constante bij Bv is 500 mm	51
Tabel 11	Uitgangswaarden voor de parameters	57
Tabel 12	Waarden bij hoogte 1800 mm en lijfbreedte 450 mm	97

SYMBOLENLIJST

A_c	Oppervlakte beton
A_p	Oppervlangte voorspankabels
A_s	Oppervlakte wapeningsstaal
A_{streng}	Oppervlangte streng voorspankabel
$A_{p,max}$	Maximale oppervlangte voorspankabels
$b_{beneden}$	Breedte onderste balk mm
b_{boven}	Breedte bovenste balk mm
b_v	Breedte verticale balk mm
b_w	breedte beschouwde deel
BC	Belastingcombinatie
BGT	Bruikbaarheids grenstoestand
d	Effectieve hoogte
d	Betondekking voorspankabel
$d1$	Minimale betondekking voorspankabel
e	Lengte excentriciteit gekromde ligger
e_{bi}	Excentriciteit binnenste kabel
e_{bu}	Excentriciteit buitenste kabel
e_{max}	Maximale excentriciteit
e_p	Excentriciteit midden voorspankabels vanaf NC
$e_{p,max}$	Maximale excentriciteit voorspankabels
e_1	Excentriciteit uiteinde voorspankabels vanaf NC
E_{cm}	Gemiddelde elasticiteitsmodulus (N/mm^2)
E_g	Eigen gewicht
E_s	Elasticiteitsmodulus wapeningsstaal (N/mm^2)
f	Pijl van de voorspankabels
f_{ck}	Karakteristieke betondruksterkte (N/mm^2)
$f_{ck,cube}$	Karakteristieke kubusdruksterkte (N/mm^2)
f_{cm}	Gemiddelde cilinderdruksterkte (N/mm^2)
f_{ctm}	Gemiddelde betontreksterkte (N/mm^2)
f_{pk}	Karakteristieke trekspanning voorspankabel
$f_{p,max}$	Maximale pijl van de voorspankabels
f_{yd}	Ontwerpwaarde treksterkte wapeningsstaal (N/mm^2)
f_{yk}	Karakteristieke vloeigrens wapeningsstaal (N/mm^2)
F_{Ed}	Rekenkundige kracht in wapeningsstaal
G	Permanente verdeelde belasting uit eigen gewicht
G_s	Permanente verdeelde belasting door asfaltlaag
h_{boven}	Hoogte bovenste balk mm
h_{onder}	Hoogte onderste balk mm
h_{tot}	Totale hoogte mm
I_{zz}	Traagheidsmoment in z-richting
k_{cb}	Onderste punt kernoppervlak
k_{ct}	Bovenste punt kernoppervlak

L	Hart op hart lengte overspanning
L_{as}	Gemiddelde As-afstand vrachtwagen
M_{BGT}	Buigend moment in BGT
M_{Ed}	Rekenkundig buigend moment
M_p	Moment uit voorspanning
$M_{t=0}$	Buigend moment op tijdstip nul
M_{UGT}	Buigend moment in UGT
$n_{strengen}$	Aantal strengen
NC	Normaalkrachtencentrum
$P_{m,c,max}$	Maximale voorspankracht uit maximale betondrukspanning
$P_{m,h}$	Horizontale voorspankracht op het tijdstip nul
$P_{m,w}$	Werkelijke voorspankracht op het tijdstip nul
$P_{m,w,max}$	Maximale toepasbare voorspankracht
$P_{m,0}$	Verticale voorspankracht op het tijdstip nul
$P_{m,\infty}$	Voorspankracht op het tijdstip oneindig
q_{ik}	Gelijkmatige verdeelde verkeers belasting
$q_{p,h}$	Horizontale krommings drukspanning
$q_{p,v}$	Verticale krommings drukspanning
$q_{p,w}$	Werkelijke krommings drukspanning
Q	Variabele verdeelde verkeersbelasting
Q_{ik}	Variabele puntlasten door verkeersbelasting
Q_{punt}	Puntbelasting vrachtwagen
Q_v	Verdeelde verkeersbelasting
r	Lengte driehoek gedeelte
R	Boogstraal gekromde ligger
S	Booglengte tussen de opleggingen van de ligger
TS	Tandemstelsel
UGT	Uiterste grenstoestand
V_{Ed}	Rekenkundige schuifkracht
V_{Rd}	Maximaal opneembare schuifkracht
W_{cb}	Weerstandsmoment onderste vezel
W_{ct}	Weerstandsmoment bovenste vezel
z	Interne hefboomsarm
Z_{gb}	Zwaartepunt voorspankabels midden van de ligger
Z_{gt}	Zwaartepunt voorspankabels oplegging van de ligger
ϵ_{c3}	Vloeigrens ‰
ϵ_{cu3}	Uiterste betonrek ‰
θ	Booghoek gekromde ligger
ρ	Percentage wapeningsstaal
σ_c	Maximale drukspanning beton
σ_{cb}	Spanning onderste vezel
σ_{ct}	Spanning bovenste vezel
σ_{pm0}	Maximale initiele trekspanning
ϕ	diameter voorspanbuis
ψ_0	Combinatiefactor



BIJLAGE A: WERKPLAN

Yorick Ligthart zal zich voornamelijk bezig gaan houden met het modelleren en mechanicedeelte van dit project. Jaap Borghans zal zich richten op de detaillering en bepaling van het ponsgedrag van de gekromde ligger.

A.1 HOOFDLIJNEN

- Literatuur betreffende het onderwerp zoeken (J.W. Borghans en Y.I.R. Ligthart)
- Handberekening ontwerp rechte voorgespannen ligger (J.W. Borghans en Y.I.R. Ligthart)
- Modelleren rechte voorgespannen ligger (Y.I.R. Ligthart.)
- Ontwerp Gekromd element met verschillende stralen (J.W.Borghans)
- Zelfde ontwerp modelleren in SCIA (Y.I.R. Ligthart)
- Een gekromd ontwerp uitwerken met krachtenwerking en ponsberekening (J.W.Borghans)
- Resultaten krachtenwerking e.d. vergelijken met model en handberekening (J.W.Borghans en Y.I.R. Ligthart)

A.2 PER WEEK

1. Week 36 (2 sep - 6 sep)
 - Startbijeenkomst algemeen en begeleider
 - Literatuur opzoeken
 - verdiepen in onderwerp
 - startnotitie schrijven
2. Week 37 (9 sep - 13 sep)
 - Startnotitie voltooien
 - Literatuur zoeken en beoordelen

- randcondities en belastinggevallen bepalen
 - geometrisch ontwerp rechte kokerligger
 - SCIA ontdekken met kleine modelleringen
3. Week 38 (16 sep – 20 sep)
- Handberekening / constructief ontwerp rechte ligger
 - Handberekeningen verwerken in verslagvorm
 - Starten met rechte voorgespannen ligger in SCIA modelleren
4. Week 39 (23 sep – 27 sep)
- Gekromde ligger ontwerpen
 - Krachtenverdeling m.b.t. kabelverloop bij voorspanning gaan bepalen
 - Rechte voorgespannen ligger in SCIA voltooien
5. Week 40 (30 sep – 4 okt)
- Ponssysteem horizontaal uittrekken voorspankabel bepalen
 - Dikte bepalen betonlaag/verschillende betondoorsnedes uitwerken
 - Begin modelleren van gekromde voorgespannen ligger in SCIA
6. Week 41 (7 okt – 11 okt)
- Continueren modelleren gekromd element SCIA
 - Ponssystemen verder uitwerken d.m.v. grafieken en vergelijkingen tussen verschillende kromtestralen
7. Week 42 (14 okt – 18 okt)
- Model SCIA completeren
 - Conclusies trekken en verwerken in eindverslag
8. Week 43 (21 okt – 25 okt)
- Laatste aanpassingen en verbeteringen
 - Definitief inleveren eindverslag
9. Week 44 (28 okt – 1 nov)
- Presentatie eindproduct

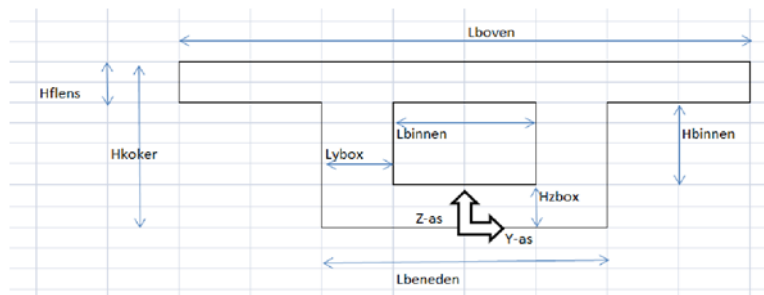
B

BIJLAGE B: BEPALINGEN CONSTRUCTIEF ONTWERP

In deze bijlage worden berekeningen getoond die gedaan zijn voor de bepaling van het constructief ontwerp. In het eerste gedeelte worden een aantal berekeningen getoond die vrij standaard zijn, maar als controle dienen op het ingevoerde excel model. In het tweede gedeelte worden de figuren en bepalingen getoond die zijn gebruikt voor de exacte bepaling van de onderflens

B.1 VOORBEELDBEREKENING STANDAARD WAARDEN

Om een voorbeeldberekening te doen, wordt er een standaarddoorsnede genomen. In onderstaande figuren worden de waardes gegeven zoals deze ook zijn gebruikt in het excel model.



Figuur 42: Doorsnede Kokerligger

Omschrijving	Afkorting	Waarde	Eenheid
Lengte boven	Lboven	6000	mm
Lengte beneden	Lbeneden	2600	mm
Lengte binnen	Lbinnen	1800	mm
Hoogte totaal	Hkoker	1400	mm
Hoogte flens	Hflens	400	mm
Hoogte binnen	Hbinnen	600	mm
Breedte box	Lybox	400	mm
Hoogte box onder	Hbox	400	mm

Figuur 43: Afmetingen van de doorsnede

Hierboven staan dus de bij behorende maten van de kokerdoorsnede. Aan de hand van de hieropvolgende handberekeningen is gecontroleerd of deze waardes ook in excel goed zijn geprogrammeerd.

B.1.1 Oppervlakte

De totale oppervlakte van de doorsnede is eenvoudig te berekenen door de koker in verschillende vlakken op te delen en al deze oppervlaktes uit te rekenen en op te tellen. Een andere mogelijkheid is de koker als een massief vierkant te rekenen en daar vervolgens de open(witte) oppervlaktes van af te trekken. Excel geeft een oppervlakte van 3920000 mm². De handberekening geeft voor de oppervlakte:

$$A_{\text{hoeken}} = 1,7 \times 0,4 + 2,6 \times 0,4 + 1,7 \times 0,4 + 2,6 \times 0,4 + 0,6 \times 0,4 + 0,6 \times 0,4 + 0,6 \times 0,4 + 0,6 \times 0,4 = 3,92 \text{ m}^2$$

Figuur 44: Handberekening Oppervlakte Kokerdoorsnede

B.1.2 Normaalkrachten centrum

De Y coördinaat van het Normaalkrachten centrum is precies in het midden van de doorsnede. Dus vanaf het midden gezien is deze 0. De Z coördinaat zal doormiddel van de volgende formule berekend worden ten opzichte van de boven as. De verdeelde componenten dragen allen bij aan de plek van de Z coördinaat van het NC. De positie van het normaal krachten centrum wordt berekend door oppervlakte van de verschillende componenten te vermenigvuldigen met de afstand tot de gekozen as, in dit geval de bovenas, en vervolgens dit te delen door de totale oppervlakte.

$$\frac{(\text{Opp Component 1} \times \text{Afstand tot bovenas}) + (\text{Opp Component N} \times \text{afstand tot bovenas})}{(\text{Totale oppervlakte})}$$

Excel geeft voor NormaalkrachtenCentrum:

- Normaalkrachten centrum Z richting: NC Z-waarde = 873,47
- Normaalkrachten centrum Y richting: NC Y waarde = 0

De handberekening geeft voor het normaalkrachten centrum:

$$\begin{aligned} & \text{Nc toe boven Z coördinaat} \quad (y \text{ coördinaat} = 0 \text{ in het midden}) \\ & \frac{1700 \cdot 400 \cdot 200 + 2600 \cdot 400 \cdot 200 + 1700 \cdot 400 \cdot 200 + 2600 \cdot 400 \cdot 200 + 400 \cdot 1000 \cdot 900 + 400 \cdot 1000 \cdot 900 + 400 \cdot 1000 \cdot 900 + 400 \cdot 1000 \cdot 900}{3,92 \cdot 10^6} \\ & = 526,53 \text{ mm} \end{aligned}$$

Figuur 45: Handberekening positie NC

De handberekening komt op een andere waarde uit omdat de handberekening t.o.v. de bovenas is berekend en de Excel berekening ten opzichte van de onderas. Als je totale hoogte minus de handberekening doet kom je op het zelfde getal uit als Excel geeft. Namelijk $1400 - 873,47 = 526,53$.

B.1.3 Traagheidsmoment

Het traagheidsmoment voor een rechthoek is eenvoudig te berekenen met de algemene formule: $1/12 b h^3$. Daarbij is b de breedte en h de hoogte van de rechthoek. Omdat het oppervlak niet uit een rechthoek bestaat maar uit meerdere samengestelde rechthoeken moet de regel van steiner worden toegepast. De algemene regel voor elke losse rechthoek wordt dan:

$$1/12 \times b \times h^3 + (b \times h \times (\text{Afstand tot NC})^2)$$

Excel geeft:

- Traagheidsmoment Z richting: $I_{zz} = 8,0231 \cdot 10^{11} \text{ mm}^4$
- Traagheidsmoment Y richting: $I_{yy} = 8,3731 \cdot 10^{12} \text{ mm}^4$

De I_{yy} en de I_{zz} zijn beide 2 keer in Excel berekend op 2 verschillende manieren.

De handberekening geeft voor I_{zz} en I_{yy} :

Handwritten calculation of I_{zz} for a composite shape, showing the sum of individual moments of inertia and the parallel axis theorem correction:

$$\begin{aligned}
 I_{zz} &= \frac{1}{12} \cdot 1700 \cdot 400^3 + 1700 \cdot 400 \cdot 326,53^2 + \\
 &\quad \frac{1}{12} \cdot 2600 \cdot 400^3 + 2600 \cdot 400 \cdot 326,53^2 + \\
 &\quad \frac{1}{12} \cdot 1700 \cdot 400^3 + 1700 \cdot 400 \cdot 326,53^2 + \\
 &\quad \frac{1}{12} \cdot 1000 \cdot 400^3 + 1000 \cdot 400 \cdot 673,47^2 + \\
 &\quad \frac{1}{12} \cdot 400 \cdot 1000^3 + 400 \cdot 1000 \cdot 373,47^2 + \\
 &\quad \frac{1}{12} \cdot 400 \cdot 1000^3 + 400 \cdot 1000 \cdot 373,47^2 = 8,023 \cdot 10^{11} \text{ mm}^4
 \end{aligned}$$

Figuur 46: Handberekening traagheidsmoment in z-richting

$$\begin{aligned}
 I_{yy} &= \frac{1}{12} \cdot 400 \cdot 1700^3 + 400 \cdot 1700 \cdot 2150^2 = \\
 &= \frac{1}{12} \cdot 400 \cdot 2600^3 + 400 \cdot 2600 \cdot 0^2 = \\
 &= \frac{1}{12} \cdot 400 \cdot 1700^3 + 400 \cdot 1700 \cdot 2150^2 = \\
 &= \frac{1}{12} \cdot 400 \cdot 1000^3 + 400 \cdot 1000 \cdot 0^2 = \\
 &= \frac{1}{12} \cdot 1000 \cdot 400^3 + 400 \cdot 400 \cdot 1100^2 = \\
 &= \frac{1}{12} \cdot 1000 \cdot 400^3 + 400 \cdot 1000 \cdot 1100^2 =
 \end{aligned}$$

$8,373 \cdot 10^{12} \text{ mm}^4$

Figuur 47: Handberekening traagheidsmoment in y-richting

B.1.4 Weerstandsmoment

De elastische weerstandsmomenten voor buiging rond de y-as en z-as zijn te berekenen via de formule waarbij het traagheidsmoment wordt gedeeld door Y coördinaat en Z coördinaat van de uiterste vezel. Wely wordt hierbij 0.

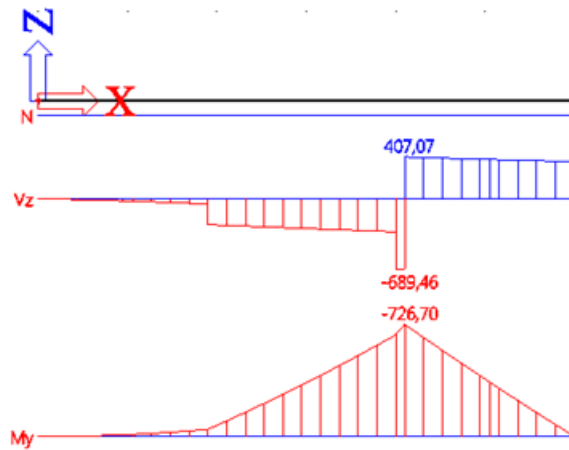
Wzt (top) wordt hierbij $I_{zz}/(\text{totale hoogte} - \text{NCz})$ (gevonden door de handberekening) = $1523,75 \text{ mm}^3$.

Het weerstandsmoment in de onderste vezel (Wzb) is I_{zz}/NCz (gevonden door Excel) = $918,52 \text{ mm}^3$

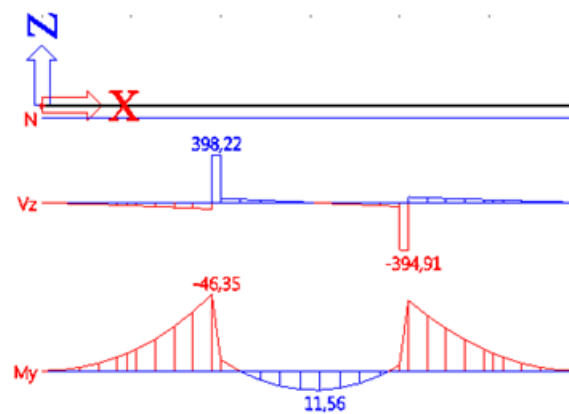
B.2 BREEDTE BOVENSTE BALK

De breedte van het onderste gedeelte van de kokerligger wordt bepaald door de krachtenverdeling in de bovenste balk. De twee verticale balken kunnen namelijk worden geschematiseerd als twee opleggingen van de bovenste balk. Via deze opleggingen ontstaan een momentenlijn en een dwarskrachtenlijn en deze moet zo gunstig mogelijk uitkomen.

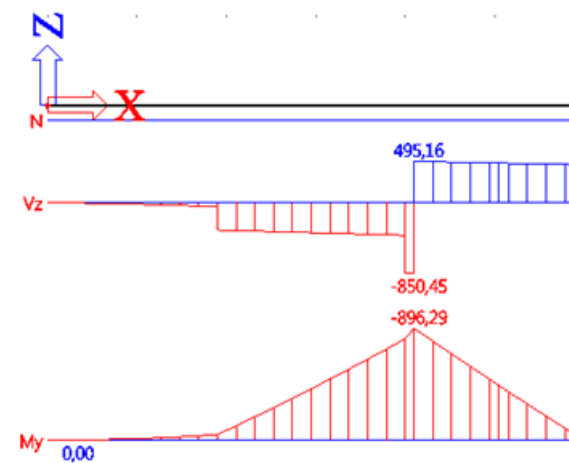
Om inzicht te krijgen in de momentlijnen en dwarskrachtlijnen bij verschillende afstanden, zijn bij een afstand van 2200, 2600, 3000 en 3400 mm tussen de opleggingen alle verschillende moment en dwarskrachtlijnen bepaald. De figuren die eruit zijn gekomen zijn weergegeven in figuur 48 tot en met figuur 63.



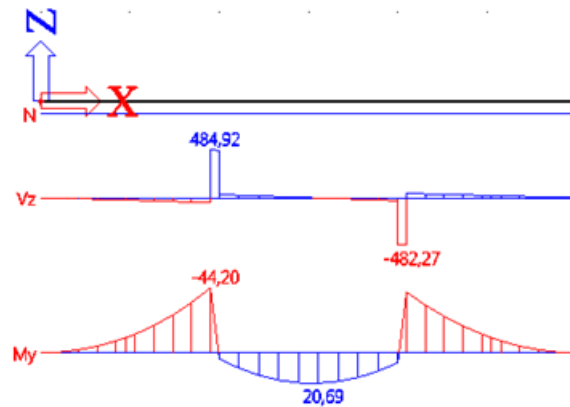
Figuur 48: Moment en dwarskrachtlijn bij 2200 mm Combinatie 1 en Plaats 1



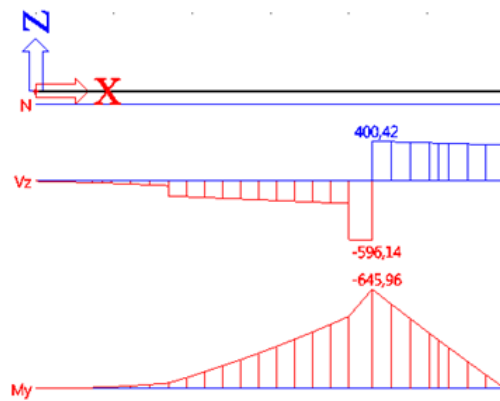
Figuur 49: Moment en dwarskrachtlijn bij 2200 mm Combinatie 1 en Plaats 2



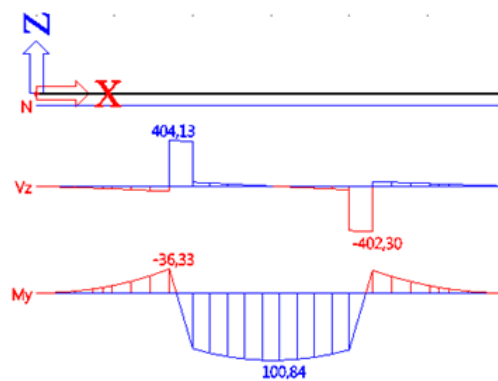
Figuur 50: Moment en dwarskrachtlijn bij 2200 mm Combinatie 2 en Plaats 1



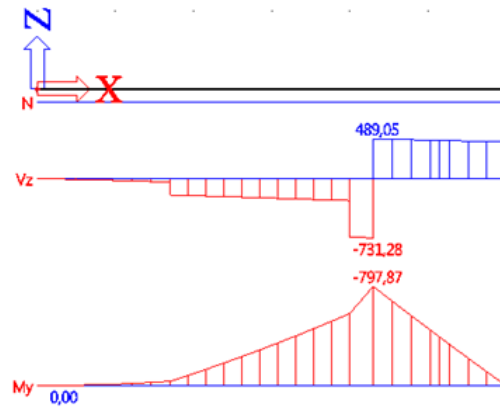
Figuur 51: Moment en dwarskrachtlijn bij 2200 mm Combinatie 2 en Plaats 2



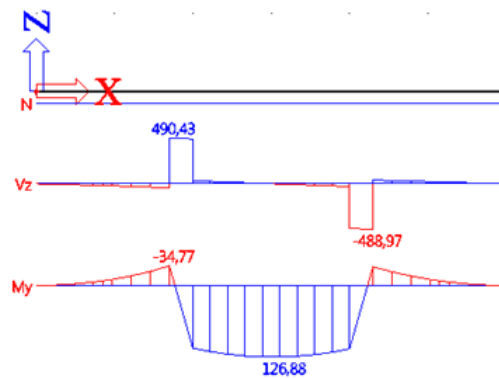
Figuur 52: Moment en dwarskrachtlijn bij 2600 mm Combinatie 1 en Plaats 1



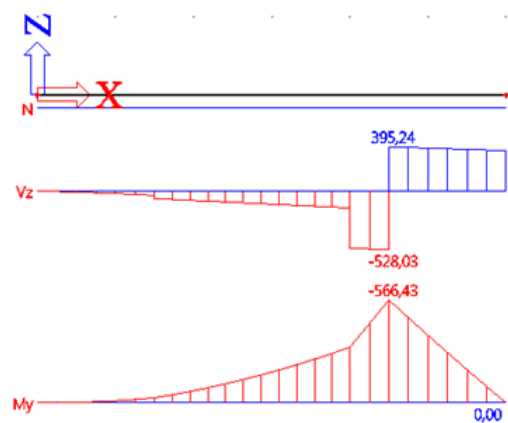
Figuur 53: Moment en dwarskrachtlijn bij 2600 mm Combinatie 1 en Plaats 2



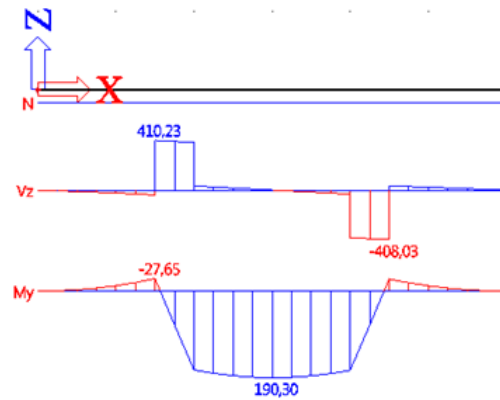
Figuur 54: Moment en dwarskrachtlijn bij 2600 mm Combinatie 2 en Plaats 1



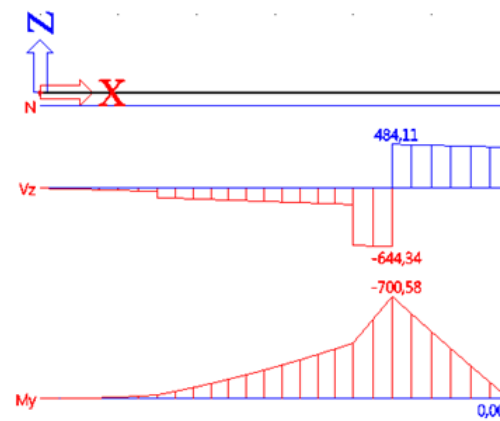
Figuur 55: Moment en dwarskrachtlijn bij 2600 mm Combinatie 2 en Plaats 2



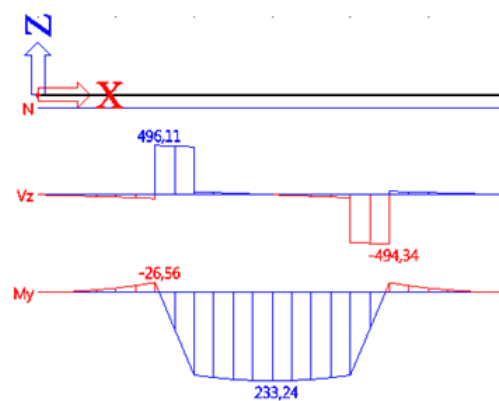
Figuur 56: Moment en dwarskrachtlijn bij 3000 mm Combinatie 1 en Plaats 1



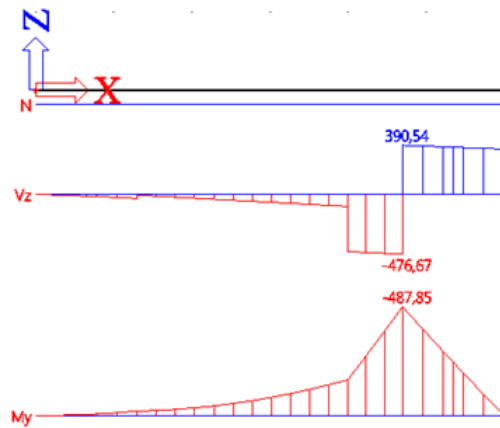
Figuur 57: Moment en dwarskrachtlijn bij 3000 mm Combinatie 1 en Plaats 2



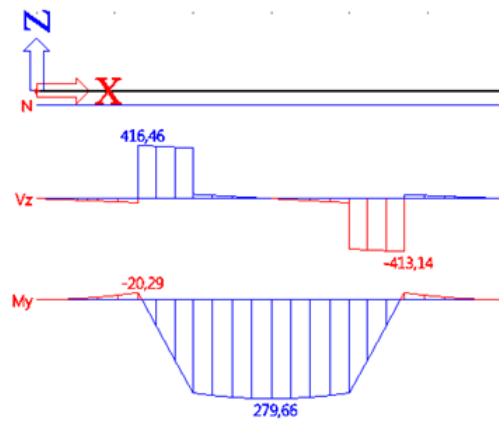
Figuur 58: Moment en dwarskrachtlijn bij 3000 mm Combinatie 2 en Plaats 1



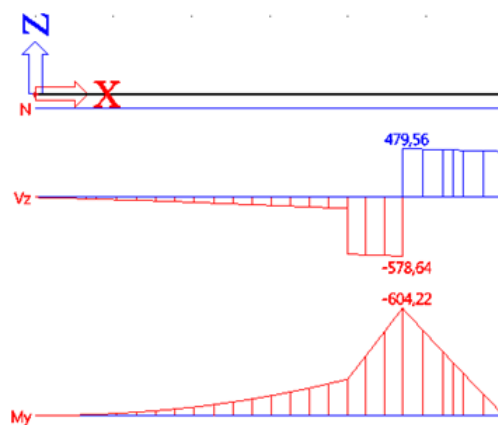
Figuur 59: Moment en dwarskrachtlijn bij 3000 mm Combinatie 2 en Plaats 2



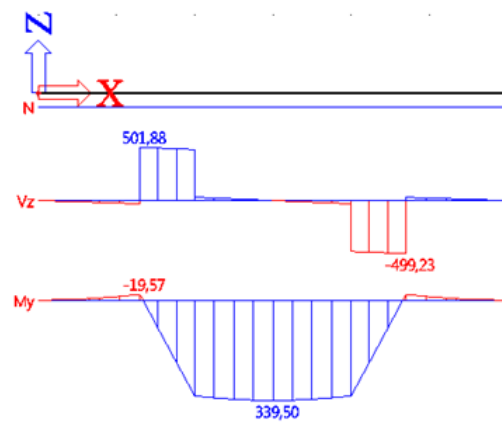
Figuur 60: Moment en dwarskrachtlijn bij 3400 mm Combinatie 1 en Plaats 1



Figuur 61: Moment en dwarskrachtlijn bij 3400 mm Combinatie 1 en Plaats 2



Figuur 62: Moment en dwarskrachtlijn bij 3400 mm Combinatie 2 en Plaats 1



Figuur 63: Moment en dwarskrachtlijn bij 3400 mm Combinatie 2 en Plaats 2

BIJLAGE C: KEUZE VOORSPANSYSTEEM

In deze bijlage wordt een berekening gemaakt met betrekking tot het voorspanstelsysteem. Uit deze berekening volgt de diameter van de voorspankabels en de minimale breedte van het lijf.

De hoogte van de doorsnede is vastgelegd op 1800 mm. Uit de resultaten van de minimale breedte van de verticale balk (400 mm) kan nu het minimum aantal voorspankabels en het exacte voorspanprofiel worden bepaald.

Voor 400 mm is de minimale initiële voorspanning 57311 kN. Voor 1000 mm blijkt dit 75623 kN te zijn. .

Bij dit ontwerp wordt met het voorgespannen strengen systeem gewerkt omdat daarbij makkelijk minder of meer voorspan oppervlakte kan worden toegevoegd. Gekozen is voor het Dywidag 'ASTM A 416' systeem. De specificaties van dit systeem zijn eerder al getoond in figuur 3 en figuur 4[2].

De strengen hebben een karakteristieke trekspanning (f_{pk}) van 1860 N/mm^2 . De maximale toelaatbare spanning van het voorspanstaal is dan

$$0,75 \times f_{pk} = 0,75 \times 1860 = 1395 \text{ N/mm}^2$$

In de minimale situatie is het minimale oppervlak aan strengen gelijk aan:

$$\frac{57311 \times 10^3}{1395} = 41083 \text{ mm}^2$$

De diameter van een streng is 140 mm^2 . Het benodigd aantal strengen in de minimale situatie is dan:

$$\frac{41083}{140} = 294$$

Omdat er zoveel strengen moeten worden geplaatst, is het verstandig om een grote buisdiameter uit te kiezen. Een grotere buisdiameter is namelijk het meest efficiënt in zijn ruimtegebruik ten opzichte van de hoeveelheid dekking die het nodig heeft en de hoeveelheid strengen die er in passen.

Eerst wordt een berekening gedaan met de op één na grootste buisdiameter die dit systeem kan leveren. Deze buis heeft een buitenste doorsnede van 121,4 mm en kan 27 strengen bergen.

Met 27 strengen wordt het minimaal aantal buizen :

$$\frac{294}{27} = 10,89 = 11$$

Vanwege symmetrie in de doorsnede, is het verstandig om een even aantal buizen te plaatsen zodat deze over beide zijde verdeeld kunnen worden. Dit wordt gedaan om de berekeningen makkelijker te houden en parameterisch uit te kunnen voeren. Indien één voorspanningsituatie specifiek wordt bekeken, zou het kunnen dat het verstandiger is om de enkele buis direct onder het normaalkrachten centrum te plaatsen waardoor er in totaal minder voorspanning nodig is.

Voor de minimale situatie zouden er dus 12 buizen met strengen moeten worden geplaatst. Het meest effectief zijn de buizen als deze voor een zo groot mogelijke pijl van de voorspankabels zorgen. Op die manier wordt de gekromde buigspanning uit de voorspankabel het grootste. Daarom wordt er per doorsnee gekeken hoeveel buizen er exact in passen.

Bij de minimale lijfbreedte van 400 mm past er maar 1 buisdiameter in. Dus bij de minimale doorsnede worden aan beide zijden 6 buizen boven elkaar geplaatst. Met een diameter van 121,4 een minimale tussenafstand van een diameter en een betondekking van 40 mm wordt het zwaartepunt van de kabels ten opzichte van de onderzijde van de ligger:

$$Z_{gb} = 40 + 5,5 \times 121,4 = 707,7 \text{ mm}$$

De daadwerkelijke pijl wordt dan:

$$f_{p,max} = 1,103 + 0,359 - 0,707 = 0,755 \text{ (m)}$$

Deze pijl is een stuk kleiner dan de in eerste instantie aangenomen pijl van 1,212 m. Omdat de daadwerkelijke pijl zoveel kleiner is zal in deze nieuwe situatie nog harder moeten worden voorgespannen. Een grotere voorspanning kan alleen voltooid worden indien er meer voorspankabels worden geplaatst. Omdat de lijfbreedte maar 400 mm is kan dit alleen in de verticale richting gebeuren. Indien dit zou gebeuren zou de pijl nog kleiner worden en moet dus de voorspankracht nog groter worden. Vandaar dat gesteld kan worden dat één verticale rij aan kabels niet voldoet.

Indien er twee kabels naast elkaar komen te liggen dient de lijfbreedte minimaal $2 \times 40 + 3 \times 121,4 = 444,2$ mm breed te zijn. De minimale breedte waarmee gerekend wordt daarom nu vastgesteld op 450 mm.

C.1 VOORSPANKABELS BIJ 450 MM LIJFBREEDTE

Voor de hoogte van de totale constructie van 1800 mm en een breedte van 450 mm van het lijf gelden de volgende waarden:

omschrijving	afkorting	waarde	eenheid
oppervlakte doorsnede	Ac	4,425	m ²
Normaalkrachten centrum z richting	Nc	1,093	m
Traagheidsmoment z richting	Izz	1,74	m ⁴
Weerstandsmoment boven	Wct	2,45	m ³
Weerstandsmoment beneden	Wcb	1,59	m ³

Tabel 12: Waarden bij hoogte 1800 mm en lijfbreedte 450 mm

De eerste rekenwaarde voor de excentriciteit van de kabel wordt dan:

$$e_p = 1,094 - 0,250 = 0,843$$

De controle op de drie eisen geeft dan:

$$\text{Eis 1 : } P_{m,0} > 58810 \text{ kN}$$

$$\text{Eis 2 : } -7176 < 0 \text{ kN/m}^2 \text{ dus voldoet}$$

$$\text{Eis 3 : } 22745 < 33000 \text{ kN/m}^2 \text{ dus voldoet}$$

Dus in eerste instantie voldoet de aangenomen pijl.

Het aantal benodigde strengen wordt met deze voorspankracht:

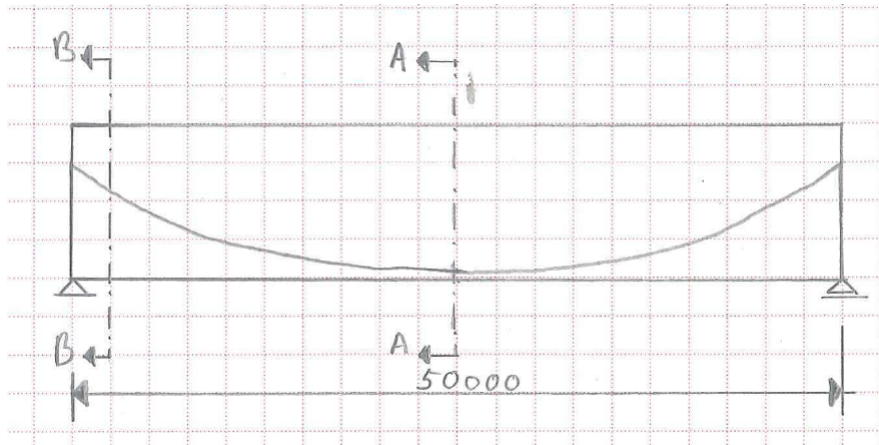
$$n_{strengen} = \frac{P_{m,0}}{f_{yk} \times A_{streng}} = \frac{58810000}{1395 \times 140} = 302$$

Het aantal te plaatsen buizen is dan:

$$\frac{302}{27} = 11,19 = 12$$

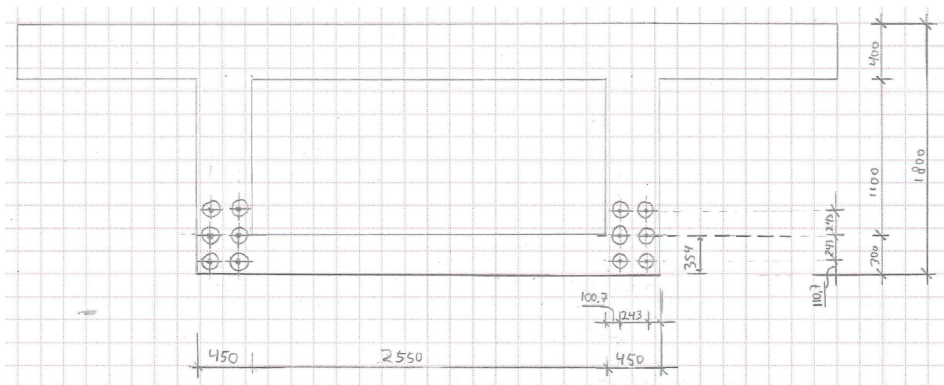
Met een lijfbreedte van 450 mm kunnen er twee buizen naast elkaar worden geplaatst, dus dat betekent dat er symetrisch aan beide kanten zes kabels worden geplaatst. Deze positionering heeft invloed op de excentriciteit van het zwaartepunt van de kabels en dus ook op het moment dat de kabels uitoefenen. Na het bepalen van de posities moet dus ook nog worden gekeken of nog aan de eerste 3 eisen wordt voldaan.

In figuur 64 is een doorsnede van de lengterichting te zien. In deze figuur zijn de plaatsen van de doorsnedes A-A en B-B te zien. Per doorsnede wordt de precieze locatie van de kabels getoond. Vanuit deze positionering wordt de pijl en de excentriciteit van de kabels kan berekend.



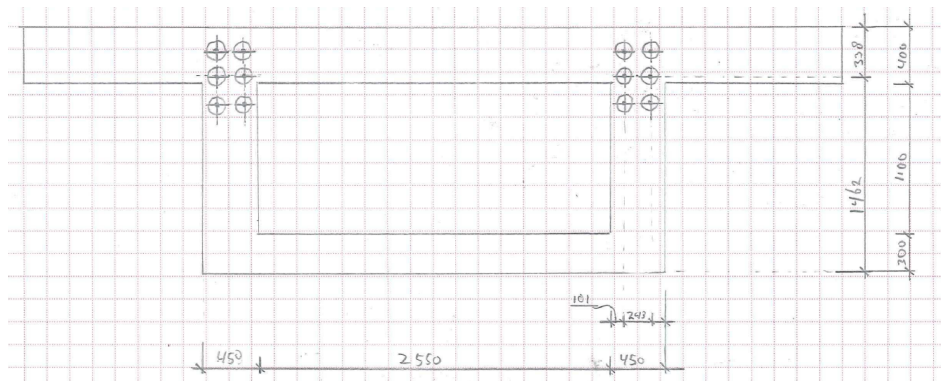
Figuur 64: Doorsnede ligger in lengterichting

In figuur 65 laat doorsnede A-A de positie van de kabels zien in het midden van de ligger. Voor de minimale betondekking aan de onderkant van de constructie is van 40 mm uitgegaan. Het zwaartepunt van de zes kabels komt voor deze doorsnede op 344 mm van de onderkant te liggen.



Figuur 65: Doorsnede A-A plaatsing voorspankabels

Figuur 66 laat doorsnede B-B zien met de posities van de kabels aan de uiteindes van de ligger. Voor het zwaartepunt van de zes kabels geldt nog steeds dat deze ligt in de top van het kern gebied. Dus op $N_c + K_{ct} = 1093 + 359 = 1452mm$ van de onderkant.



Figuur 66: Doorsnede B-B plaatsing voorspankabels

Nu kan de pijl (f_{450}) van dit ontwerp met 12 kabels bepaald worden. Deze bestaat uit het verschil tussen het zwaartepunt van de kabels in het midden van de ligger en het zwaartepunt van de kabels aan het uiteinde van de ligger. Deze wordt dus:

$$f_{450} = 1452 - 344 = 1108 \text{ mm}$$

De excentriciteit wordt dan:

$$e_{p,450} = 1108,3 - 358,9 = 749,6 = 750 \text{ mm}$$

Nu de werkelijke pijl bekend is moet gecontroleerd worden of nog aan alle eisen wordt voldaan.

Voor een excentriciteit ($e_{p,450}$) van 0,75 m en de nieuwe waarden geldt dan een minimaal benodigde voorspankracht van:

$$P_{m,\infty} \geq \frac{M_{BGT}}{\frac{W_{cb}}{A_c} + e_{p,450}} = \frac{56544}{\frac{1,59}{4,425} + 0,75} = 51017 \text{ kN}$$

Vergelijking 14 geeft dan:

$$P_{m,0} = \frac{P_{m,\infty}}{0,8} = \frac{50972}{0,8} = 63771 \text{ kN}$$

Met een oppervlakte aan voorspankabels van 45360 mm en een trekspanning van 1395 N/mm² wordt de maximale trekkracht die uitgeoefend kan worden 63277 kN. De initiële benodigde voorspankracht is groter dan deze maximale trekkracht, dus aan deze eis wordt niet voldaan.

Er zijn nu twee opties mogelijk om de constructie toch aan alle eisen te laten voldoen. De eerste is om extra buizen met strengen bij te plaatsen. Bij die optie moet dan wel worden gecontroleerd of, met deze extra buizen en dus een nieuwe pijl, de voorspanning nog voldoet. De tweede optie is om een grotere buisdiameter te nemen. Een grotere buisdiameter heeft daarentegen wel invloed op de minimale breedte van de constructie.

Omdat het plaatsen van extra kabels niet optimaal is voor de spanningen in de constructie, wordt er voor gekozen om eerst een nieuwe berekening te doen met een grotere voorspanbuis waar meer strengen in passen. Het gaat daarbij om de grootste buisdiameter die beschikbaar is, namelijk een buis met een diameter van 138,4 mm waar 37 strengen in passen.

Omdat al eerder is bepaald dat enkele buizen in de verticale richting niet voldoen, zullen er minimaal twee buizen naast elkaar geplaatst moeten worden. Het plaatsen van twee buizen naast elkaar zorgt ervoor dat de lijfbreedte minimaal $2 \times 40 + 3 \times 138,4 = 495,2$ mm moet zijn. Om het makkelijk te houden wordt de minimale breedte op 500 mm aangenomen.

C.2 VOORSPANKABELS BIJ 500 MM LIJFBREEDTE

Nu wordt gekeken hoe het profiel van de voorspankabels eruit zou komen te zien bij een breedte van 500 mm. De hoogte is nog steeds hetzelfde, namelijk 1800 mm.

Voor de beginrekenwaarde voor de excentriciteit wordt de volgende waarde bepaald:

$$e_p = 1,084 - 0,250 = 0,834$$

De controle op de drie eisen geeft:

$$Eis\ 1 : P_{m,0} > 60314\ kN$$

$$Eis\ 2 : -7273 < 0\ kN/m^2\ \text{dus voldoet}$$

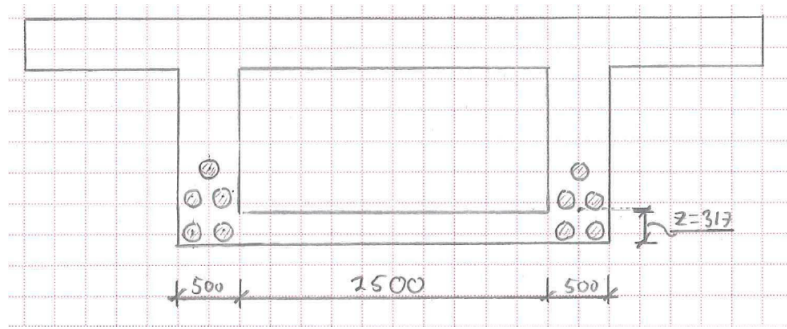
$$Eis\ 3 : 22316 < 33000\ kN/m^2\ \text{dus voldoet}$$

Het aantal benodigde strengen wordt dan:

$$n_{strengen} = \frac{P_{m,0}}{f_{yk} \times A_{streng}} = \frac{60314000}{1395 \times 140} = 309$$

Het minimaal aantal te plaatsen buizen is dan:

$$\frac{309}{37} = 8,35 = 10$$



Figuur 67: Plaatsing kabels bij breedte van 500 mm

Vanwege het behoud van symmetrie van de constructie worden aan beide kanten 5 kabels toegepast. De doorsnede met de plaatsing van de kabels op positie A-A is te zien in figuur 67. Het zwaartepunt van de voorspankabels in het midden van de ligger wordt dan:

$$Z_{gb} = 40 + 2 \times 138,4 = 316,8 \text{ mm}$$

De daadwerkelijke pijl wordt dan:

$$f_{p,500} = 1,084 + 0,358 - 0,317 = 1,125 \text{ (m)}$$

En de excentriciteit wordt dus:

$$e_{p,500} = 1,084 - 0,317 = 0,767 \text{ (m)}$$

Met deze werkelijke pijl kan worden gekeken of de constructie nog aan alle eisen voldoet. De controle op de drie eisen geeft:

$$\text{Eis 1 : } P_{m,0} > 63894 \text{ kN}$$

$$\text{Eis 2 : } -8579 < 0 \text{ kN/m}^2 \text{ dus voldoet}$$

$$\text{Eis 3 : } 22316 < 33000 \text{ kN/m}^2 \text{ dus voldoet}$$

Met 10 kabels is het oppervlakte van de voorspankabels 51800 mm. Met een trekspanning van 1395 N/mm² wordt de maximale trekkracht die uitgeoefend kan worden 72261 kN. Deze waarde is groter dan de minimaal benodigde voorspanning dus er wordt aan alle eisen voldaan.

Uit voorgaande berekeningen kan worden vastgesteld dat de lijfbreedte minimaal 500 mm moet zijn omdat er minimaal twee kabels van 138,4 mm naast elkaar moeten passen. Natuurlijk hoeft dit bij situaties waarbij de lijfbreedte breder is niet perse te gelden. Het kan dan bijvoorbeeld zo zijn dat een iets kleinere diameter van de buis veel beter in de constructie past en als nog alle krachten kan opvangen. Maar om in het vervolg consistent te kunnen rekenen en parametrisch te kunnen ontwerpen, wordt aangenomen dat voor elke situatie de keuze valt op de buis waar 37 strengen in passen en diameter heeft van 138,4 millimeter.

D

BIJLAGE D: PLAATSING EN AANTAL VOORSPANKABELS

In deze bijlage wordt gekeken hoeveel voorspankabels er maximaal kunnen worden geplaatst bij een bepaalde breedte van de verticale balk. Door hier een vergelijking voor te geven kan voor elke breedte van de verticale balk het maximaal te plaatsen oppervlak aan voorspankabels worden bepaald. Dit kan dan gebruikt worden om de maximale trekkracht te bepalen.

Eerst wordt een uitdrukking gegeven voor de horizontale verdeling ofwel hoeveel kabels er naast elkaar kunnen liggen. Daarna wordt er gekeken naar de verticale verdeling. Deze verdeling heeft onder andere invloed op de gemiddelde pijl van de voorspankabels.

D.1 HORIZONTALE VERDELING

In deze paragraaf wordt een uitdrukking gegeven voor het maximaal aantal kabels dat naast elkaar kan liggen en de betondikte laag tussen de maatgevende kabel en de buitenzijde, afhankelijk van de breedte van het verticale gedeelte.

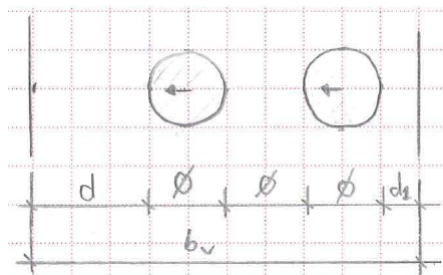
Hierbij wordt ervan uitgegaan dat de kabels zo worden geplaatst dat voor de uittrekkende maatgevende kabel de betondekking zo groot mogelijk is. Indien de kabel naar links wil worden uitgetrokken worden de kabels dus zo ver mogelijk rechts geplaatst. Door deze plaatsing komt het gezamenlijke zwaartepunt van de kabels niet op de normaalkrachtenlijn van de constructie te liggen en krijgt dus een excentriciteit.

Indien dit bij een rechte ligger zou gebeuren zou dit een extra moment in het horizontale vlak geven. Maar omdat er hier toch al naar een gekromde ligger wordt gekeken, welke al een moment/kromming in het horizontale vlak geeft, wordt dit effect niet meegenomen.

Als beginvergelijking voor de breedte van de verticale balk in relatie tot de betondikte wordt gegeven:

$$d_1 + \phi + \phi + \phi + d = b_v \rightarrow d = b_v - 3\phi - d_1$$

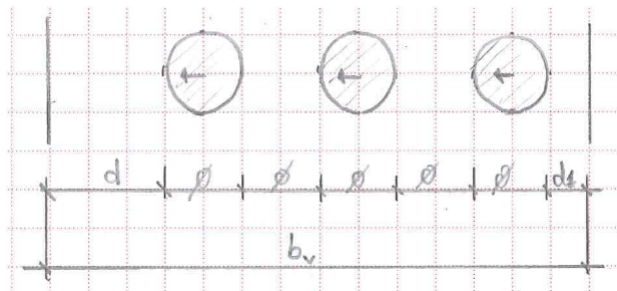
In deze vergelijking is d_1 de betondekking aan de kant waar de kabel er niet uitgetrokken wil worden. ϕ is de diameter van de gebruikte buis waar de voorspankabel in ligt. d is de dikte van de betondekking aan de kant waar de kabel er uitgetrokken wil worden en b_v is de totale breedte van de verticale balk. In figuur 68 is dit ter verduidelijking weergegeven. Deze beginvergelijking is van toepassing als $b_v > 3\phi + 2d_1$. Er worden bij deze breedte 2 kabels naast elkaar toegepast. In de vergelijking is drie maal de diameter van de buis te vinden. Deze ontstaat doordat volgens de eurocode de minimale afstand tussen twee buizen minimaal de gebruikte buisdiameter moet zijn.



Figuur 68: Uitdrukking bij plaatsing van 2 kabels

Als de verticale balk breed genoeg is kunnen er 3 kabels naast elkaar worden toegepast. Dit is van toepassing als $b_v > 5\phi + 2d_1$. Vanaf die lengte geldt voor de breedte van de verticale balk en de betondikte:

$$d_1 + \phi + \phi + \phi + \phi + \phi + d = b_v \rightarrow d = b_v - 5\phi - d_1$$

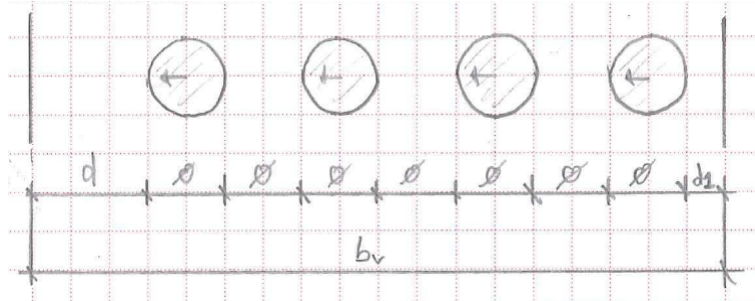


Figuur 69: Uitdrukking bij plaatsing van 3 kabels

Een schets van deze situatie met 3 kabels is weergegeven in figuur 69. Wanneer de breedte van de verticale balk nog groter genomen wordt passen er op een gegeven moment 4 kabels naast elkaar in de constructie. Er kunnen 4 kabels worden toegepast als $b_v > 7\phi + 2d_1$. De dikte van de betondekking wordt dan gegeven door:

$$d_1 + \phi + \phi + \phi + \phi + \phi + \phi + \phi + d = b_v \rightarrow d = b_v - 7\phi - d_1$$

Deze formule is uitgevoerd te zien in figuur 70.



Figuur 70: Uitdrukking bij plaatsing van 4 kabels

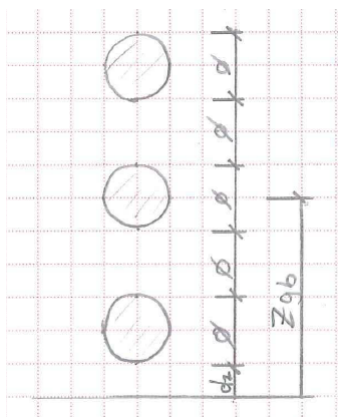
Zoals uit de bovenstaande vergelijkingen is op te maken, verandert de formule steeds met 2ϕ en kan dus bij nog bredere situaties ook zo worden doorgezet.

D.2 VERTICALE VERDELING

In deze paragraaf wordt een uitdrukking gegeven voor de pijl(f) afhankelijk van het aantal kabels dat onder elkaar wordt geplaatst. Eerst wordt gekeken naar het gebruik van 3 kabels boven elkaar en daarna naar 4 boven elkaar geplaatste kabels. De plaatsing van 2 of 5 kabels boven elkaar is achterwegen gelaten omdat later zal blijken dat die aantallen niet voordelig zullen zijn om de minimale straal te verkrijgen. Het doel van deze paragraaf is om de uiterste pijl te bepalen, omdat een grotere pijl voordelig werkt op het moment uit voorspanning.

3 kabels boven elkaar

Bij het plaatsen van 3 kabels boven elkaar komt dit in het midden van de ligger vanaf de onderkant uit te zien zoals in figuur 71.



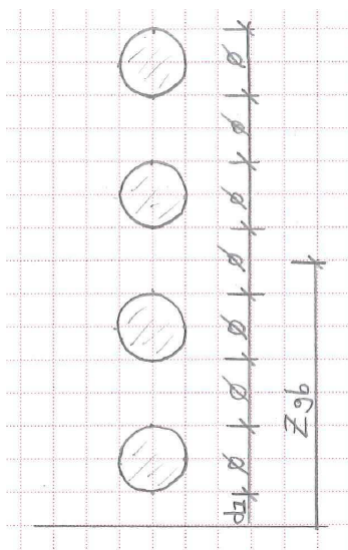
Figuur 71: Bepaling verticaal zwaartepunt met 3 kabels

In deze figuur is af te lezen dat het onderste zwaartepunt (Z_{gb}) van de kabels in de verticale richting ligt op een afstand vanaf de onderkant gemeten van:

$$Z_{gb} = d_1 + \phi + \phi + \frac{1}{2} \phi = d_1 + 2,5 \phi$$

4 kabels boven elkaar

Bij de plaatsing van 4 kabels boven elkaar komt logischerwijs het zwaartepunt vanaf de onderkant gezien hoger te liggen. De situatie is weergegeven in figuur 72.



Figuur 72: Bepaling verticaal zwaartepunt met 4 kabels

Uit deze figuur is af te leiden dat voor het zwaartepunt geldt dat:

$$Z_{gb} = d_1 + \phi + \phi + \phi + \frac{1}{2} \phi = d_1 + 3,5 \phi$$

Om de maximale pijl te verkrijgen zouden de zojuist vastgelegde zwaartepunten ook voor het uiteinde van de ligger vanaf de boven-

kant genomen moeten worden. Daarbij moet wel gelden dat het zwaartepunt binnen het kernvlak van de constructie ligt.

Dus als geldt dat:

$$h_{tot} - Z_{gb} < N_c + K_{ct}$$

Dan is het bovenste zwaartepunt aan het eind van de ligger vanaf de onderkant gemeten:

$$Z_{gt} = h_{tot} - Z_{gb}$$

Is dit niet het geval dan geldt voor het bovenste zwaartepunt:

$$Z_{gt} = N_c + K_{ct}$$

In deze formules is h_{tot} de totale hoogte van de constructie, N_c het normaalkrachtencentrum en K_{ct} de top van het kernoppervlak.

De pijl (f) wordt dan bepaald volgens:

$$f = Z_{gt} - Z_{gb}$$

Zoals in figuur 13 is uitgetekend zal de voorspankabel boven het normaalkrachtencentrum aangrijpen. Daarom moeten ook de excentriciteit boven het normaalkrachten centrum (e_1) en de excentriciteit onder het normaalkrachtencentrum (e_p) worden bepaald.

De afstand tussen het aangrijppunt van de voorspankabels en het normaalkrachtencentrum wordt bepaald volgens:

$$e_1 = Z_{gb} + f - N_c$$

De afstand tussen het normaalkrachtencentrum en het laagste zwaartepunt van de voorspankabels is dan als volgt:

$$e_p = f - e_1 = f - (Z_{gb} + f - N_c) = N_c - Z_{gb}$$

BIJLAGE E: AFLEIDINGEN

E.1 MINIMALE STRAAL UIT BETONDIKTE

De formule die moet gelden om de uittrekken te voorkomen is:

$$V_{Rd} = \frac{e \times P_{m,0}}{f \times n_k \times R}$$

Deze vergelijking kan in combinatie met vergelijking 24 om de minimale straal te verkrijgen worden omgeschreven volgens:

$$\begin{aligned} \frac{V_{Rd} \times f \times n_k}{e \times P_{m,0}} &= \frac{1}{R} \\ \frac{V_{Rd} \times f \times n_k}{P_{m,0}} &= \frac{e}{R} \\ \frac{V_{Rd} \times f \times n_k}{P_{m,0}} &= \frac{R - \sqrt{R^2 - (\frac{1}{2} L)^2}}{R} \\ \frac{V_{Rd} \times f \times n_k}{P_{m,0}} &= 1 - \frac{\sqrt{R^2 - (\frac{1}{2} L)^2}}{R} \\ (1 - \frac{V_{Rd} \times f \times n_k}{P_{m,0}})^2 &= \frac{R^2 - \frac{1}{4} L^2}{R^2} \\ (1 - \frac{V_{Rd} \times f \times n_k}{P_{m,0}})^2 &= 1 - \frac{\frac{1}{4} L^2}{R^2} \\ \frac{4}{L^2} (1 - (1 - \frac{V_{Rd} \times f \times n_k}{P_{m,0}})^2) &= \frac{1}{R^2} \\ \sqrt{\frac{1}{\frac{4}{L^2} (1 - (1 - \frac{V_{Rd} \times f \times n_k}{P_{m,0}})^2)}} &= R \end{aligned}$$

Voor de minimale straal bepaald uit de dikte van de betondeklaag geldt dus:

$$R_{min} \geq \sqrt{\frac{1}{\frac{4}{L^2} (1 - (1 - \frac{V_{Rd} \times f \times n_k}{P_{m,0}})^2)}}$$

F

BIJLAGE F: EVALUATIE

Bij de start van het onderzoek vond ik het erg lastig om snel stappen te maken. Het vastleggen van dimensies bleek een zwaardere opdracht dan gedacht en heeft meer tijd gekost dan gehoopt. Zeker omdat er met zoveel tegelijk rekening gehouden moest worden. Wel is dit zeer leerzaam geweest.

In het zoeken naar ontwerpeisen en dus een ontwerpgrafiek ben ik vanuit het oogpunt van de breedte van de verticale balk aan de slag gegaan. Dit is gedaan omdat de breedte van de verticale balk ook de betondeklaag van de voorspankabels bepaald. Maar door dit te doen werd het uiteindelijk heel lastig om een directe relatie met de minimale boogstraal te leggen. Zeker na de conclusie dat voor de gekozen doorsnede de uittrekking helemaal niet maatgevend was. Toen heb ik getracht om vanuit dezelfde denkwijze de minimale boogstraal vanuit het oogpunt van de krachtverhouding vast te leggen. Op een gegeven moment is dit gelukt maar daarbij zijn wel een aantal aannames gemaakt die misschien niet het voordeligste zijn voor de constructiedoorsnede.

Verder is het zo dat de breedte van de verticale balk normaalgesproken niet iets is wat je als uitgangspunt neemt. Normaliter is het zo dat bij een ontwerpvoorbeeld de overspanning bekend is en dat je als het goed is ook weet wat de boogstraal is. Eigenlijk ben ik er pas te laat achter gekomen (toen de tijd voor het eindwerk er al bijna op zat) dat ik via de verkeerde kant een benadering heb gedaan. Indien ik eerder tot dit inzicht was gekomen had ik het vanaf de kant van de boogstraal kunnen benaderen. Wat wel positief is is dat ik, en misschien ook de lezer, meer inzicht heb gekregen in de werking van gekromd voorspannen.

Wat ik wel soms vervelend vond is dat de begeleidende docent vaak niet op de tu aanwezig was. Eenmaal per week was er een afspraak, maar vaak liep ik al veel eerder tegen bepaalde dingen aan. Ik zat met vragen die van belang waren om verder te kunnen met het project, maar omdat de begeleider niet op de tu was kreeg ik deze vragen niet beantwoord. Daardoor voelde ik mij soms geremd in de

voortgang van het project.

Het maken van dit Bachelor Eindwerk heeft me veel geleerd. Zo heb ik meer inzicht gekregen in de werking van de voorspanning en de voorspankrachten. Daarnaast heeft het me veel geleerd over de verbanden tussen de voorspankabels en de plaatsing daarvan en de benodigde voorspankrachten als gevolg van de veranderende pijl. Tevens heeft het me geleerd om een ontwerpvragestuk deels op te lossen. Het daadwerkelijk iets vanuit het niets ontwerpen heeft tot veel ergernis geleid maar ook veel geleerd. Zo heb ik me nu wegwijs gemaakt in het lezen van de Eurocode. Tot aan dit project was het bij alle ontwerpvakken zo dat er een dictaat geschreven was aan de hand van de Eurocode's, maar eigenlijk kreeg je deze zelf nooit te zien. De normaliter voorgestelde situatie moest nu zelf helemaal bepaald worden.

Daarnaast heb ik veel ervaring opgedaan in excel en latex door in deze twee programma's het hele Bachelor eindwerk uit te voeren.