



RWS BEDRIJFSVERTROUWELIJK

Rijkswaterstaat Grote
Projecten en Onderhoud

Griffioenlaan 2
3526 LA Utrecht
Postbus 2232
3500 GE Utrecht
T 088 797 21 11
www.rijkswaterstaat.nl

Contactpersoon

Technisch adviseur betonnen
bruggen en viaducten

memo

Oplegnotitie CV Nelson Mandelabrug

M

Datum

8 december 2022

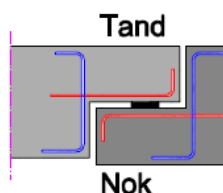
Object	Nelson Mandelabrug
Locatie/omschrijving	Fiets/voetgangersbrug over de A12, bij Zoetermeer
Bouwjaar	1990
Rapportage	[1] W22074_RAP02-V.1.1 Constructieve analyse tandopleggingen bestaande brug, Wagemaker Versie 1.1 Status: Definitief
Opdrachtgever rapportage	Gemeente Zoetermeer
Reviewers	Geen
Datum	24-11-2022
Versie oplegnotitie	Definitief

Inleiding

Bij de tand-nok-opleggingen van de Nelson Mandelabrug zijn in 2018 tijdens een inspectie zeer grote scheuren geconstateerd in de nokken. Door Wagemaker is een constructieve analyse van de tandopleggingen uitgevoerd. In deze oplegnotitie wordt dit rapport behandeld.

Op 2-12-2022 heeft de gemeente Zoetermeer Rijkswaterstaat voor de eerste keer gevraagd om te adviseren en een spoed advies op te stellen met betrekking tot de situatie van de Nelson Mandelabrug.

Wagemaker [1] maakt geen onderscheid in de definitie tanden en nokken, en benoemt beiden als 'tanden'. Om onderscheid te maken wordt dit in deze oplegnotitie wel gedaan. In deze oplegnotitie is de tand onderdeel van het brugdek (prefab liggers) en draagt op de nok. De nok is onderdeel van de onderliggende constructie en zorgt dat de belasting van het brugdek wordt overgedragen. In Figuur 1 is dit visueel weergegeven.



Figuur 1 Definitie tanden en nokken

Verder in deze oplegnotitie worden de bevindingen, zoals Wagemaker heeft opgeschreven in hoofdstuk 8, behandeld. De belangrijkste bevindingen in het rapport van Wagemaker zijn:

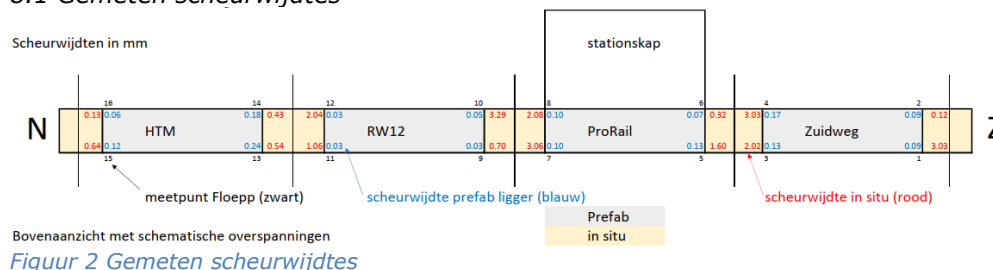
- Forse scheurwijdtes in de nok (tot 3.29 mm, waargenomen bij een visuele inspectie);
- De verticale belastingen zijn hoger dan waar in het ontwerp rekening mee is gehouden;
- De variabele belastingen, zoals temperatuur, wind*, krimp en kruip, zijn niet rekening gebracht;
- De wapening in de tanden en nokken zijn niet juist gedetailleerd.

*Om te kunnen beoordelen of het niet in rekening brengen van wind relevant is, zouden de momentane belastingcombinaties moeten worden beschouwd.

Aanvullend aan het rapport Wagemaker is in deze oplegnotitie een constructieve toets van de nok uitgevoerd.

Bevindingen rapport Wagemaker [1]

8.1 Gemeten scheurwijdtes



Tijdens een visuele inspectie zijn zeer grote scheurwijdtes in de nokken geconstateerd (variëren tussen de 0.12 mm en 3.29 mm). Bij een scheurwijdte van 3 mm is plastisch vervorming van de wapening al opgetreden.

Bij de tanden zijn de scheurwijdtes zeer beperkt (variëren van 0.06 en 0.24 mm) en te verwachten bij dit constructiedetail. De belasting vanuit het brugdek moet namelijk via de tanden worden overgedragen. In de tand komt de wapening op spanning (trek), wat vaak samen gaat met een scheur in het beton. Bij bruggen met tanden en nokken van RWS worden op deze locatie ook vaak scheuren geconstateerd. Bij de gemeten scheurwijdtes bevindt de spanning in de wapening zich nog onder de vloeigrens.

8.2 Tand en zwaard belast dan berekend

Wagemaker concludeert dat de randliggers zwaarder worden belast, dan waarin het ontwerp van de brug rekening mee is gehouden. Deze analyse wordt gedeeld door RWS.

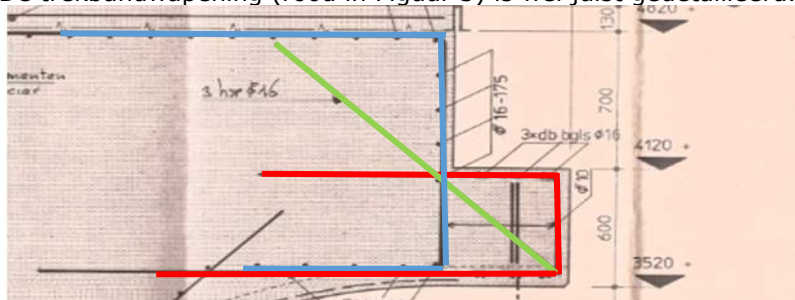
8.3 Tand en zwaard zijn onjuist gedetailleerd

In §5.2.5 wordt de detaillering van de tand van de prefab ligger beschouwd. Uit de analyse volgt dat wapening in de tand onjuist is gedetailleerd. Deze analyse wordt gedeeld door RWS. Hierbij moet echter het volgende worden opgemerkt. Van de tand is geen constructieve beschouwing gemaakt. Aangezien bij de tand geen grote scheurwijdtes zijn geconstateerd en in verhouding meer wapening (en voorspanning) aanwezig is dan in de nok, wordt de tand als minder kritisch beschouwd. Uit grootschalig onderzoek naar tanden en nokken is geconcludeerd dat tanden meestal niet maatgevend zijn. In tegenstelling tot de nok.

In §5.3.6 wordt de detaillering van de nok beschouwd. Uit de analyse volgt dat de wapening in de nok onjuist is gedetailleerd. Deze analyse wordt gedeeld door RWS. De volgende onderdelen zijn niet juist gedetailleerd:

- De ophangwapening (blauw in Figuur 3): De wapening aan de onderzijde had richting de nok gebogen moeten worden.
- De diagonale wapening (groen in Figuur 3): De wapening is niet verankerd in het boven- en ondernet.

De trekbandwapening (rood in Figuur 3) is wel juist gedetailleerd.



Figuur 3 Wapening nok

8.4 Vergelijk analyse geconstateerde scheuren met detaillering en belastinggrootte

Zie de constructieve toets in het volgende hoofdstuk.

8.5 Mate van overbelasting

Door Wagemaker is bepaald dat de verticale belasting hoger is dan waar in het ontwerp rekening mee is gehouden. Dit komt met name doordat de kap op de randligger draagt. De totale belasting is, zonder belastingsfactoren, 1.2 hoger (1043 kN/ 868 kN). In de constructieve toets in bijlage A is uitgegaan van de hogere verticale belastingen, zoals bepaald in §6.2[1].

8.6 Horizontale belasting

Zoals Wagemaker terecht concludeert, is de horizontale belasting niet in rekening gebracht. Door verhinderde vervorming kan een zeer grote horizontale belasting optreden in de nok. Dit kan overigens alleen plaats vinden wanneer de dilataties niet goed functioneren. Aangezien de capaciteit van de nok beperkt is, kan een opgelegde vervorming bij een significante temperatuursbelasting direct leiden tot forse scheurvorming.

8.7 Veranderlijke belasting

Zoals Wagemaker terecht concludeert, is geen temperatuursbelasting in rekening gebracht. De temperatuursbelasting kan ontstaan door verhinderde vervorming.

8.8 Ontbrekende situaties

Zoals Wagemaker terecht concludeert, zijn veel situaties niet in rekening gebracht.

8.9 Type scheuren

Het type scheuren (scheurwijdte en scheurlengte) zorgt een verzwakking van de sterkte van de nok en kan leiden tot een afname van de dwarskrachtcapaciteit.

8.10 Conclusies berekening Westenberg memo 1: Ztm.105-016-v5

Zie de constructieve toets in het volgende hoofdstuk.

8.11 Openstaande punten/open eindjes

In bijlage E benoemt Wagemaker de openstaande punten. Er zijn bijvoorbeeld veel invloeden niet beschouwd, die wel degelijk invloed hebben op de sterkte van de constructie. Dit zijn o.a. zettingen, temperatuur, krimp en kruip.

Aanvullende constructieve toets

Door Wagemaker is de nok niet constructief getoetst. Dit wordt in deze oplegnotitie alsnog gedaan door het model van de Koningsbrug als basis te nemen.

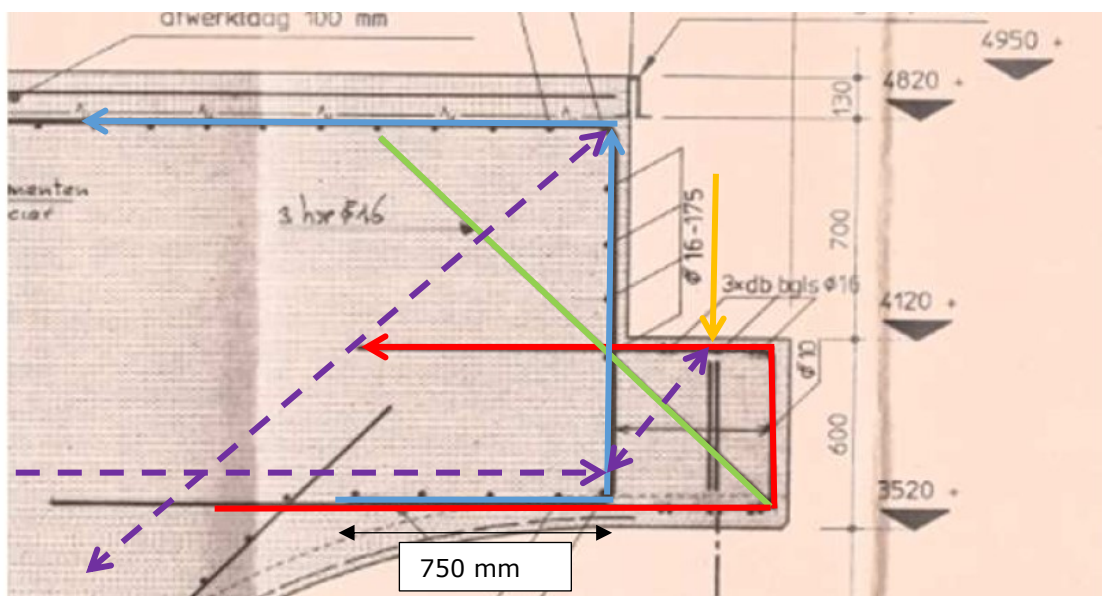
Rijkswaterstaat Grote
Projecten en Onderhoud

Datum

8 december 2022

De detaillering van de wapening in de nok vertoont sterke overeenkomsten met de Koningsbrug bij Arnhem (viaduct in beheer van RWS). Zowel de ophangwapening (blauw, Figuur 4) als de diagonale wapening (groen, Figuur 4) is bij de Koningsbrug op dezelfde manier gedetailleerd. Voor de Koningsbrug is een uitgebreide constructieve analyse uitgevoerd. Met een lineaire eindige-elementen-berekening is aangetoond dat de slecht gedetailleerde ophangwapening wel degelijk in staat is om belasting te kunnen overdragen. De diagonale wapening is in deze berekening rekenkundig niet meegenomen, wel werd geconstateerd dat dit in extra reserve is.

De constructieve toets wordt uitgevoerd met behulp van de vakwerkanalogie, zoals onder andere is beschreven in de Eurocode (EC2-1-1 art. 10.9.4.6 (1)). Aangezien de diagonale wapening niet goed is verankerd, wordt de belasting gedragen door vakwerk A (combinatie trekbandwapening en verticale ophangwapening). Aangezien de verticale ophangwapening niet juist is gedetailleerd, grijpt de drukdiagonaal (paars, Figuur 4) hoger aan, waardoor een groter aandeel door horizontale trekbandwapening (rood, Figuur 4) opgenomen moet worden. Dit is bepaald op basis van een constructieve analyse van de Schipbeekbrug (object in beheer van RWS).c Voor de Schipbeekbrug is een niet-lineaire-eindige-elementenberekening uitgevoerd naar slecht gedetailleerde wapening in tanden en nokken. Daar is onder andere vergelijking gemaakt tussen goed-gedetailleerde ophangwapening en slecht gedetailleerde ophangwapening. Snapshots van deze resultaten zijn gegeven in bijlage A.



Figuur 4 Wapening nok met krachswerking volgens Vakwerk A

Staaf	Wapening				Verankeringslengte*
1. Blauw	1	hrsp.	Ø32	h.o.h. 140	$750/1270 = 0,59 < 1,00 \rightarrow$ beperkt
2. Rood	1	hrsp.	Ø20	h.o.h. 200	voldoende
3 Groen	3	hrsp.	Ø16	-	onvoldoende/slecht

Voor de constructieve toets zijn de volgende uitgangspunten genomen:

- Verticale belastingen komen uit rapport Wagemaker;
- Horizontale belastingen zijn 10% of 20% van verticaal;
- De belasting grijpt aan in hart van de oplegging;
- Alle wapening onder de ligger is meegenomen in de constructieve toets (meewerkende breedte van 1.170 m);
- De ophangwapening is in staat om belastingen te kunnen dragen (aanneمة op basis van constructieve analyse Koningsbrug);
- Verankeringslengte van ophangwapening is minimaal 750 mm.
- De hoek van de drukdiagonaal is ca. 46 graden (aanneمة op basis van analyse Schipbeekbrug).
- Voor de staalspanning in de wapening wordt de karakteristieke staalspanning (f_{yk}) genomen. De gemiddelde staalspanning ligt nog ca. 8% hoger.

**Rijkswaterstaat Grote
Projecten en Onderhoud**

Datum

8 december 2022

De ophangwapening is getoetst in bijlage A en voldoet. In dezelfde beschouwing is geconcludeerd dat de trekbandwapening maatgevend is. De trekbandwapening wordt getoetst op karakteristieke waarden, omdat deze berekening wordt gebruikt ter ondersteuning van de analyse over de geconstateerde scheurwijdtes.

In de onderstaande tabel is de staalspanning in de trekbandwapening weergegeven. Er wordt onderscheid gemaakt tussen de belastingen voor en na de afsluiting van de brug voor voetgangers en fietsers. In het laatste geval worden alleen de permanente belastingen meegenomen.

voor afsluiting

Belastingscombinatie	σ_s [N/mm ²]	f_{yk} [N/mm ²]	[%]
Horizontaal door totale belasting	543	500	109%
Horizontaal door totale belasting + 10 % verticale belasting	599	500	120%
Horizontaal door totale belasting + 20 % verticale belasting	656	500	131%

na afsluiting

Belastingscombinatie	σ_s [N/mm ²]	f_{yk} [N/mm ²]	[%]
Horizontaal door permanent	428	500	86%
Horizontaal door permanent + 10 % verticale belasting	473	501	94%
Horizontaal door permanent + 20 % verticale belasting	518	502	103%

Alleen door de permanente belasting wordt een staalspanning van 428 N/mm² gevonden. Er is dus weinig capaciteit over om de variabele belastingen op te nemen. Als daar een bijkomende spanning ten gevolge van de variabele belasting bijkomt, kan vloeien van de wapening optreden. Door de gevonden scheurwijdtes heeft dit al meerdere malen plaats gevonden. Dit heeft echter nog niet tot breuk van de wapening geleid, maar zou bij een iets grotere scheurwijdte wel tot breuk kunnen leiden. Daarom wordt geadviseerd om de scheurwijdte te monitoren.

Een constructieve toets op basis van de vigerende normen en richtlijnen (Eurocode en RBK) is niet uitgevoerd, omdat de constructie al niet in staat is om de karakteristieke belastingen te dragen. De nok voldoet dus ruim niet aan het minimale niveau van constructieve veiligheid en kan dus niet in de huidige staat wordt gehandhaafd. Actie is dus noodzaak.

Oordeel

De constructieve veiligheid is op dit moment onvoldoende geborgd. Het risico is op dit moment acceptabel. Geadviseerd wordt om direct maatregelen te nemen om het risico te verlagen. De volgende maatregelen worden als geschikt geacht:

- Het verlagen van de permanente belasting door het wegnemen van de rustende belastingen (o.a. overkapping);
- Aanbrengen tijdelijke ondersteuning (stutten) tot constructie kan worden versterkt.

Ondertekening

De inhoud van voorliggende notitie is besproken en overeengekomen met technisch specialisten van de afdeling GPO Bruggen en Viaducten.

Besproken in overleg met de vakgroep betonconstructies, faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, d.d. 7-12-2022, waarbij hij heeft aangegeven de conclusies te onderschrijven.

Deze oplegnotitie is opgesteld door:

Naam:
Functie: Technisch Adviseur Kunstwerken
Datum: 07-12-2022

BIJLAGE A

Constructieve toets nok

**Rijkswaterstaat Grote
Projecten en Onderhoud**

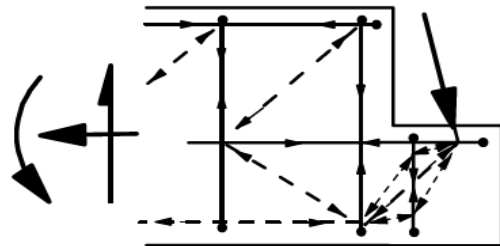
Datum
8 december 2022

A Capaciteit nok

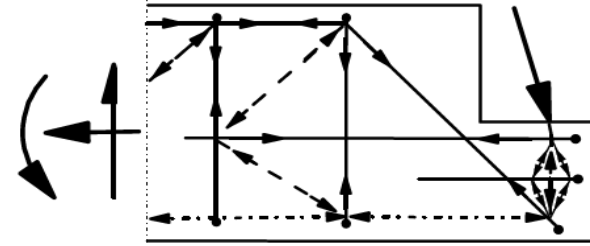
A.1 Vakwerkmodellen

Nokopleggingen mogen zijn berekend met gebruikmaking van staafwerkmodellen. Figuur 7.1 en 7.2 tonen de indicatieve modellen zoals weergegeven in figuur 10.4 van EC2.

Doordat de diagonale staven niet juist zijn verankerd, kan vakwerk B niet optreden. De belastingen in de nok worden gedragen door vakwerk A (vakwerk A, zie figuur 7.1 en vakwerk B, zie figuur 7.2). In de onderstaande figuren is de krachtwerking van beide vakwerken weergegeven.



Figuur A.1 Vakwerkmodel A

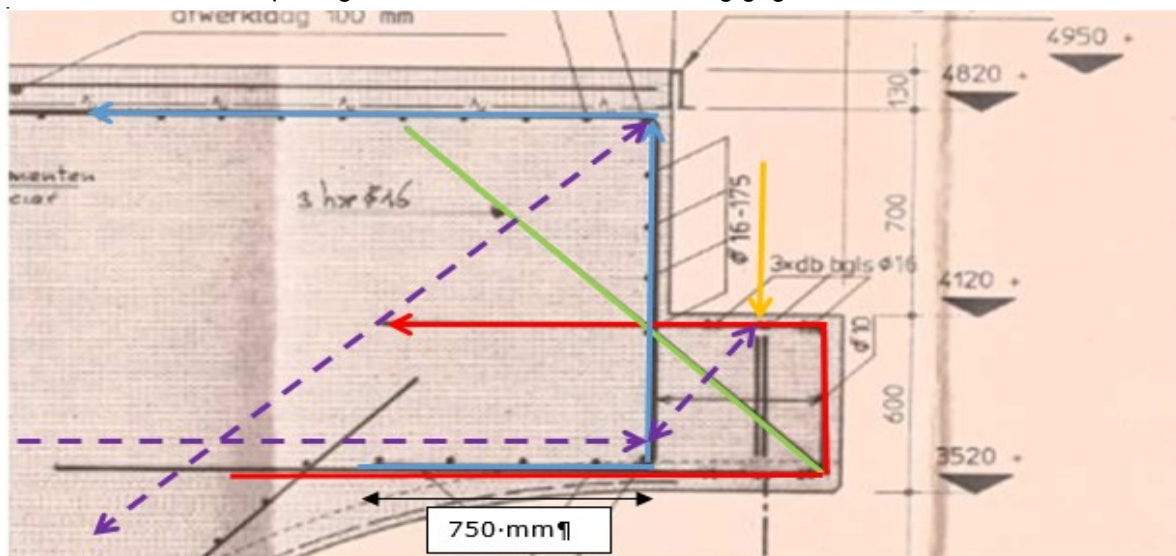


Figuur A.2 Vakwerkmodel B

De figuren tonen alleen de belangrijkste kenmerken van de staafwerkmodellen. Volgens EC2-1-1 art. 10.9.4.6 (1) mogen de twee modellen worden gecombineerd.

A.2 Wapening nokoplegging ligger

Onderstaand is de wapening in de nok van de ondersteuning gegeven.



Figuur A.3 Wapeningsdetail nok (wapeningshoeveelheid per meter)

Staal	Wapening				Verankeringslengte*
1. Blauw	1	hrsp.	Ø32	h.o.h. 140	$750/1270 = 0,59 < 1,00 \rightarrow$ beperkt
2. Rood	1	hrsp.	Ø20	h.o.h. 200	voldoende
3 Groen	3	hrsp.	Ø16	-	onvoldoende/slecht

* De benodigde verankeringslengte is bepaald in §
In de nok zijn diagonale staven aanwezig (zie figuur 3, in groen). Aan de bovenzijde zijn de diagonale staven echter niet verankerd, waardoor deze staven in de berekening niet worden meegenomen. De horizontale staaf (zie figuur 3, oranje) is niet meegenomen in vakwerk A, omdat de staaf zich slechts gedeeltelijk in de trekzone bevindt.

A.3 Berekening capaciteit vakwerken in nok

In de nok zijn verticale staven aanwezig (blauw). Ook zijn er horizontale staven aanwezig (zie figuur 3, in rood). In de onderstaande berekening wordt de capaciteit van de nokconstructie bepaald.

Vakwerk A - verticale ophangwapening nok

1. Blauw 1 hrsp. h.o.h. 140 Ø32 $A_{s2} = n \cdot \pi/4 \cdot \varnothing^2 = 7,14 \cdot 804 = 5745 \text{ mm}^2/\text{m}$

Staaldoorsnedeoppervlak werkzame verticale staven	$A_s = \sum A_{s,i} = 5745 \text{ mm}^2/\text{m}$
Rekenwaarde van de treksterkte van de beschouwde wapening	500B $f_{yk} = 295 \text{ N/mm}^2$
Maximale staafkracht	$R_{v,B} = Z_v = A_s \cdot f_{yd} = 5745 \cdot 295 = 1696 \text{ kN / m}$

Vakwerk A - Trekbandwapening nok

2. Rood 1 hrsp. h.o.h. 200 Ø20 $A_{s2} = n \cdot \pi/4 \cdot \varnothing^2 = 5 \cdot 314 = 1571 \text{ mm}^2/\text{m}$

Staaldoorsnedeoppervlak werkzame staven	$A_s = \sum A_{s,i} = 1571 \text{ mm}^2$
Rekenwaarde van de treksterkte van de beschouwde wapening	500B $f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$
Maximale staafkracht	$1571 \cdot 500 = 785 \text{ kN / m}$

A.4 Bepaling hoek drukdiagonaal

Hart oplegging	275 mm	h nok	600 mm
Dekking	35 mm	Dekking	35 mm
Staafdiameter	Ø32 mm	Aangrijppunt	224 mm = 7 · Ø
a	326 mm	b	341 mm

$$\beta = 46,29$$

A.5 Bepalen maatgevende belastingen

Onderstaand worden de maatgevende belastingen bepaald.

Maatgevende permanente belastingen

Verticale belasting per oplegging	$V_{rep} = 823 \text{ kN / ligger}$
Getoetste verticale belasting op de nok W.b. 1,17 m	$V_{rep} = 703 \text{ kN / m}$
(Aangenomen) hoek tussen de drukdiagonaal en de trekband	$\beta = 46,29^\circ \quad [A.8]$
Horizontale kracht vakwerk A	$H_B = V_{rep,A} / \tan(\beta) = 672 \text{ kN / m}$
Horizontale belasting op de nok (10% verticaal) $H_{rep} =$	$0,1 \times 703 = 70 \text{ kN / m}$
Horizontale belasting op de nok (20% verticaal) $H_{rep} =$	$0,2 \times 703 = 141 \text{ kN / m}$

Maatgevende variabele belastingen

Verticale belasting per oplegging	$V_{rep} = 220 \text{ kN / ligger}$
Getoetste verticale belasting op de nok W.b. 1,17 m	$V_{rep} = 188 \text{ kN / m}$
(Aangenomen) hoek tussen de drukdiagonaal en de trekband	$\beta = 46,29^\circ \quad [A.8]$
Horizontale kracht vakwerk A	$H_B = V_{rep,A} / \tan(\beta) = 180 \text{ kN / m}$
Horizontale belasting op de nok (10% verticaal) $H_{rep} =$	$0,1 \times 188 = 19 \text{ kN / m}$
Horizontale belasting op de nok (20% verticaal) $H_{rep} =$	$0,2 \times 188 = 38 \text{ kN / m}$

A.6 Toets trekbandwapening

De staalspanning in de trekbandwapening wordt getoetst op representatieve waarden. Dit wordt gedaan door de horizontaal kracht door permanent te beschouwen en vervolgens daar variabele en horizontale belastingen bij op te tellen.

Belasting		f_{rep} N/mm ²	Kar	Kar	Kar	Kar	Kar	Kar
Horizontale kracht vakwerk A	permanent	428	1	1	1	1	1	1
10% verticale belasting	permanent	45		1			1	
20% verticale belasting	permanent	90			1			1
Horizontale kracht vakwerk A	variabel	114				1	1	1
10% verticale belasting	variabel	12					1	
20% verticale belasting	variabel	24						1

voor afsluiting

Belastingscombinatie	σ_s N/mm ²	f_{yk} N/mm ²	[%]
Horizontaal door totale belasting	543	500	109%
Horizontaal door totale belasting + 10 % verticale belasting	599	500	120%
Horizontaal door totale belasting + 20 % verticale belasting	656	500	131%

na afsluiting

Belastingscombinatie	σ_s N/mm ²	f_{yk} N/mm ²	[%]
Horizontaal door permanent	428	500	86%
Horizontaal door permanent + 10 % verticale belasting	473	501	94%
Horizontaal door permanent + 20 % verticale belasting	518	502	103%

A.7 Toets Ophangwapening

De trekbandwapening wordt getoetst op karakteristiek met belastingsfactoren gelijk aan 1,0 en op afkeurniveau CC3. In de laatstgenoemde belastingscombinatie wordt 6.10a als maatgevend geacht, omdat de permanente belasting overwegend aanwezig is. De belastingsfactor van de variabele belasting is vermenigvuldigd met een momentaanfactor van 0,8.

Belasting		V_{rep} [kN/m]	Kar
Verticale belasting	permanent	703	1
Verticale belasting	Variabel	188	1

Belastingscombinatie	V_{rep} [kN/m]	$V_{R,kar}$ [kN/m]	UC [-]
Karakteristiek	891	1696	0,53

A.8 Tabel verankeringslengte

o.b.v. de NEN-EN 1992-1-1+C2:2011

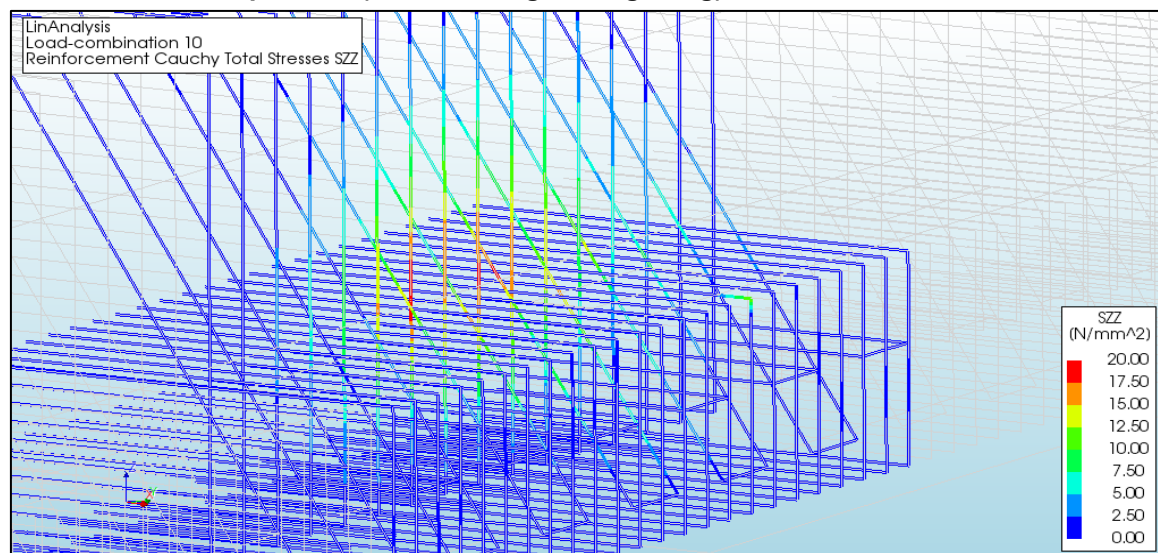
Invoerparameters

Betonsterkteklasse		C25			Correctiefactoren
Partiële materiaalfactor beton		$\gamma_c = 1,50$	-		$\alpha_1 = 1,00$
Rekenwaarde staalspanning	FeB500B	$\sigma_{sd} = 435$	N/mm ²		
Hart-op-hart afstand		$s = 140$	mm		$\alpha_3 = 1,00$
Dekking		$c = 35$	mm		$\alpha_4 = 1,00$
Zijdelingse dekking (hoekstaaf)		$c_1 = 35$	mm		$\alpha_5 = 1,00$
Afronden naar veelvoud van		$m = 10$	mm		$\alpha_6 = 1,00$
Goede aanhechtomstandigheden		$\eta_{1,goed} = 1,00$	-		trekstaaf
Slechte aanhechtomstandigheden		$\eta_{1,slecht} = 0,70$	-		

Verankeringslengte - C25 - FeB500B - c = 35 [mm] - s = 140 [mm]

Ø [mm]								Omstandigh.
Ø8	Ø10	Ø12	Ø16	Ø20	Ø25	Ø32	Ø40	
230	280	350	530	720	950	1270	1760	Goed
320	400	490	760	1020	1360	1820	2510	Slecht

A.9 Effectieve breedte per blok (beschouwing Koningsbrug)



Figuur A.5 Spanning in de diagonale wapening t.g.v. eenheidslast op oplegblok

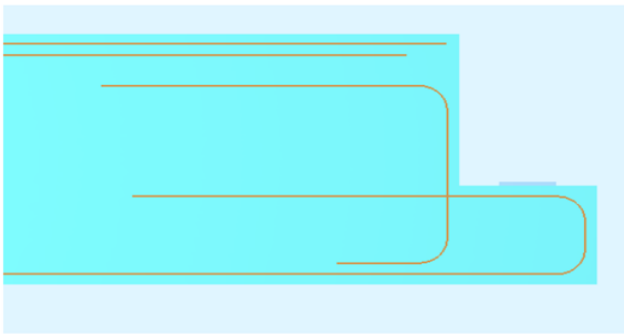
De spreidingsbreedte is bepaald aan de hand van het DIANA-model. De staven die een staalspanning hebben worden aangesproken bij het opnemen van de eenheidsbelasting (zie figuur E-5). In totaal worden er 10 verticale staven belast. Aangezien er sprake is van een overlap van de invloed door de lasten op de oplegblokken en de positie van de staven in werkelijkheid iets af kunnen wijken, wordt er voor de berekening uitgegaan van 9 staven.

Tevens is te zien dat de diagonale staven (groen in figuur A.5) ook zijn geactiveerd. Deze staven leveren dus ook een bijdrage aan de capaciteit van de nok. Dit wordt in berekening niet meegenomen, echter kan dit beschouwd worden als een verborgen capaciteit.

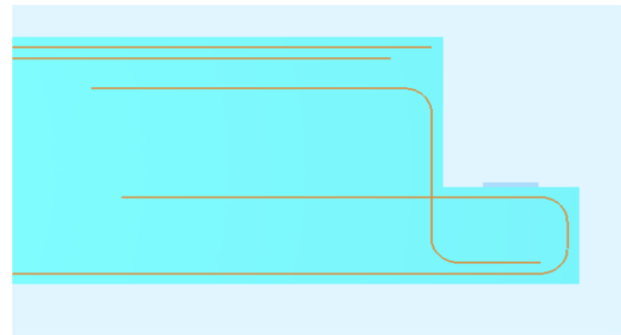
Dit is gebruikt om de meewerkende breedte te bepalen. De volledige breedte onder de nok is

A.10 Aangrijppunt drukdiagonaal (beschouwing Schipbeekbrug)

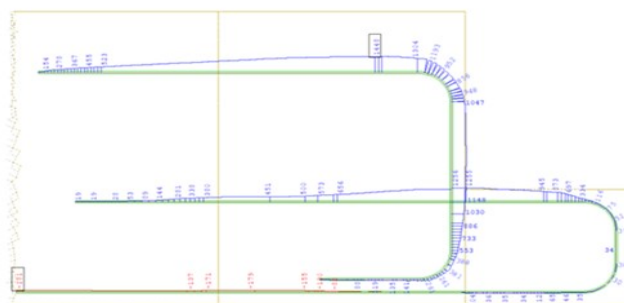
Bij de Schipbeekbrug is met behulp van een NLEEA-berekening beschouwd welk effect de fout gedetailleerde ophangwapening heeft op de krachtswerking. Dit is weergegeven in onderstaande figuren. De drukdiagonaal lijkt aan te grijpen aan de bovenzijde van buiging van de staaf. Dit is gebruikt om de hoek



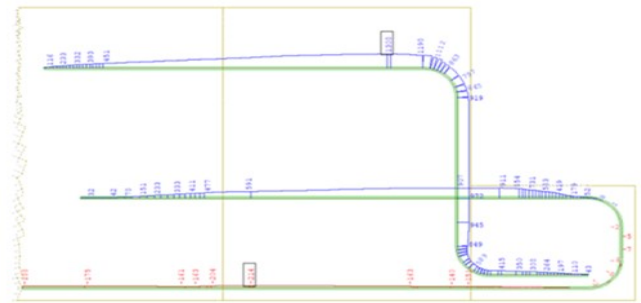
Figuur 5-3 Wapeningsconfiguratie model 3



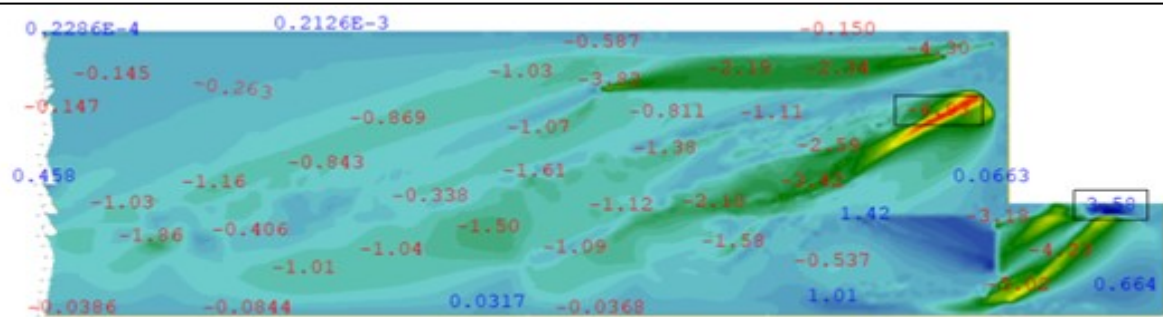
Figuur 5-4 Wapeningsconfiguratie model 4



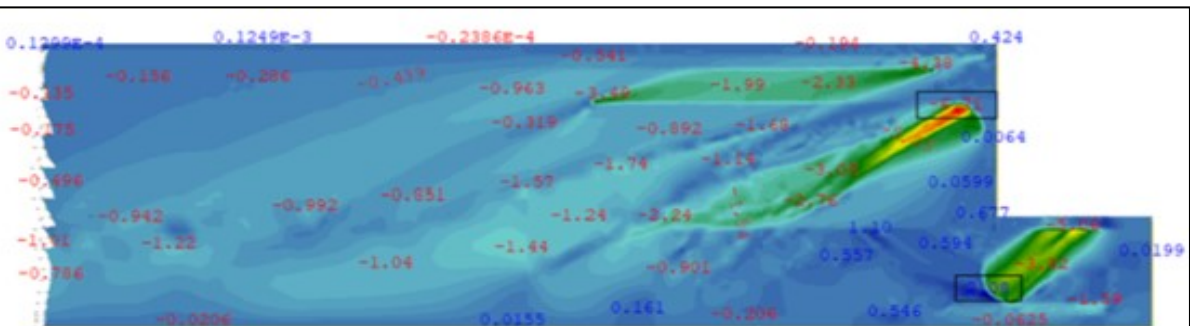
Figuur 5-20 Normalkrachten in staven model 3



Figuur 5-22 Normalkrachten in staven model 4



Figuur 5-21 Spanningen in beton model 3



Figuur 5-23 Spanningen in beton model 4