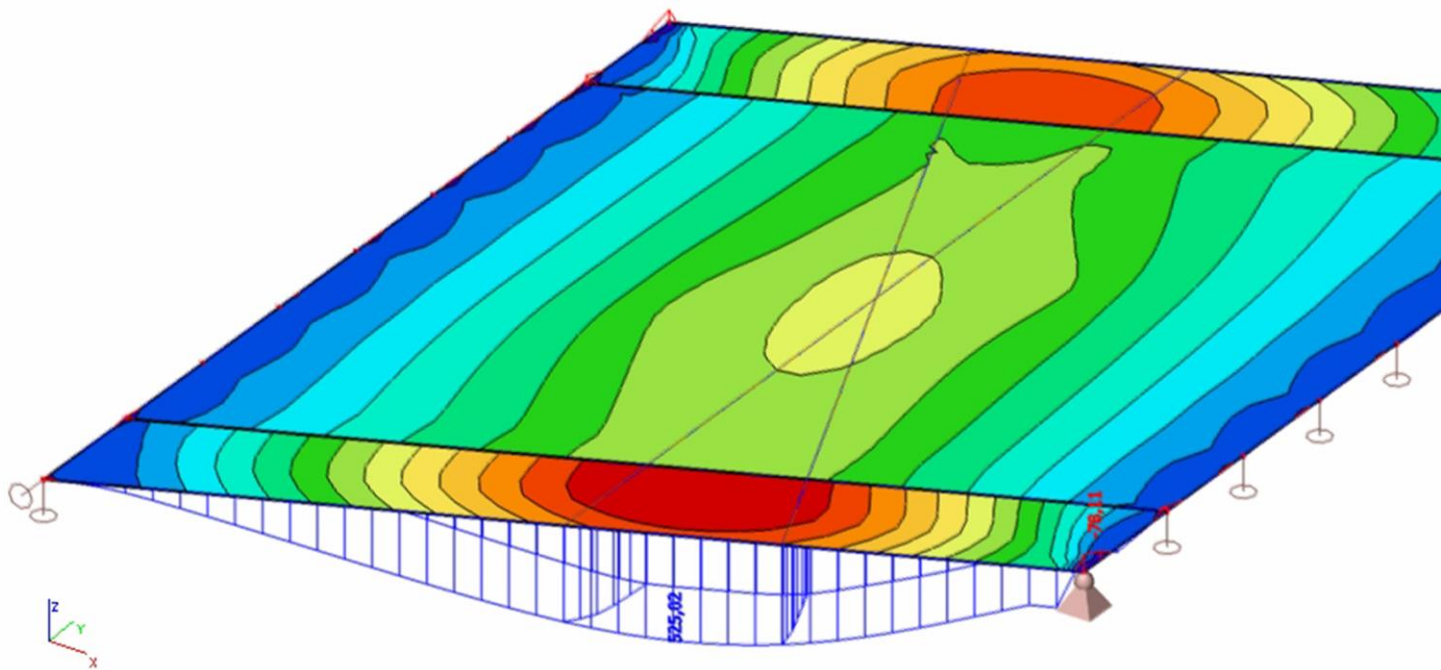
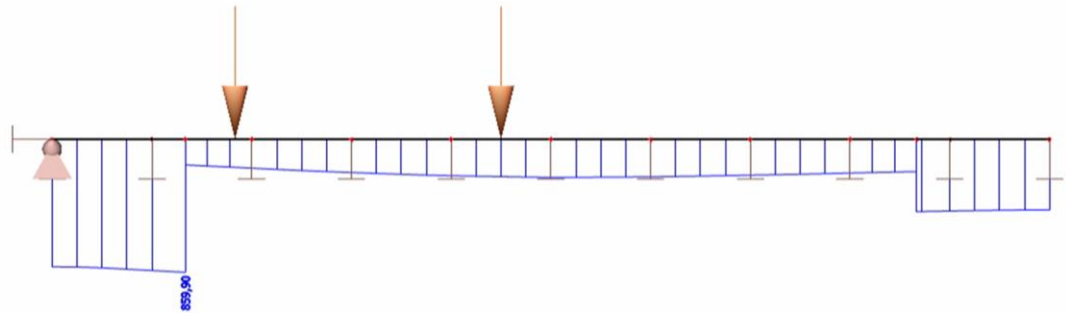


# Krachtsverdeling in een betonnen brugdek

Cecilia Braendstrup

Faculteit Civiele Techniek en  
Geowetenschappen



---

# KRACHTSVERDELING IN EEN BETONNEN BRUGDEK

## DE INVLOED VAN VERSTERKTE RANDSTROKEN EN SCHEEFSTAND OP DE MOMENTENVERDELING IN DE HALVEMAANSBRUG

**CECILIA BRAENDSTRUP**

4152239



### **EINDRAPPORTAGE**

CTB3000 | BACHELOR EINDWERK

27 OKTOBER 2014

TU DELFT, FACULTEIT CIVIELE TECHNIEK EN GEOWETENSCHAPPEN

### **BEGELEIDERS:**

DR. IR. S.A.A.M. FENNIS

DR. IR. P.C.J. HOOGENBOOM

## VOORWOORD

Voor u ligt het eindrapport dat het resultaat is van een onderzoek naar de invloed van versterkte randstroken en scheefstand op de momentenverdeling in het brugdek van de Halvemaansbrug. In een periode van acht weken is deze brug onderzocht met behulp van een modellering in het eindige elementenmethode-programma Scia Engineer. Dit onderzoek heeft plaatsgevonden in het kader van het Bachelor Eindwerk, ter afronding van mijn bacheloropleiding Civiele Techniek aan de TU Delft.

Graag zou ik mijn begeleiders dr. ir. S.A.A.M. Fennis en dr. ir. P.C.J. Hoogenboom willen bedanken voor de goede begeleiding en ondersteuning tijdens dit onderzoek. Dankzij hun adviezen, uitleg en expertise heb ik in twee maanden tijd veel kunnen bereiken in dit onderzoek.

Ik wens u veel leesplezier toe.

Delft, 27 oktober 2014

Cecilia Braendstrup

# INHOUDSOPGAVE

|                                                                    |           |
|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>VOORWOORD</b>                                                   | <b>0</b>  |
| <b>SAMENVATTING</b>                                                | <b>5</b>  |
| <b>1 INLEIDING</b>                                                 | <b>6</b>  |
| 1.1 DOELSTELLING                                                   | 7         |
| 1.2 STRUCTUUR                                                      | 7         |
| <b>2 MODELLERING VAN HET BRUGDEK IN SCIA</b>                       | <b>8</b>  |
| 2.1 GEOMETRIE                                                      | 8         |
| 2.2 OPLEGGINGEN                                                    | 9         |
| 2.2.1 Mogelijke opleggingen                                        | 9         |
| 2.2.2 Keuze oplegging                                              | 12        |
| 2.2.3 Plaats oplegging                                             | 12        |
| 2.3 BELASTING                                                      | 13        |
| 2.3.1 Bepaling verkeersbelasting volgens norm                      | 13        |
| 2.3.2 Invoer belastingen in Scia                                   | 14        |
| 2.4 BEREKENING EN WEERGAVE MOMENTENVERDELING                       | 17        |
| 2.4.1 Momenten in het rechte brugdek                               | 17        |
| 2.4.2 Momenten in het scheefstaande brugdek                        | 19        |
| <b>3 PARAMETERSTUDIE RECHT BRUGDEK</b>                             | <b>20</b> |
| 3.1 INLEIDING                                                      | 20        |
| 3.2 VARIATIE DIKTE RANDSTROKEN                                     | 20        |
| 3.2.1 Resultaten                                                   | 20        |
| 3.2.2 Effecten van kleine variaties in de dikte van de randstroken | 21        |
| 3.3 VARIATIE E-MODULUS RANDSTROKEN                                 | 23        |
| 3.3.1 Resultaten variatie tussen E-moduli van betonsoorten         | 23        |
| 3.3.2 Vergelijking met variatie dikte randstroken                  | 23        |
| 3.3.3 Mogelijke oorzaken van de afwijkingen                        | 25        |
| 3.4 VARIATIE BREEDTE RANDSTROKEN                                   | 26        |
| 3.4.1 Resultaten                                                   | 27        |
| 3.4.2 Vergelijking met variatie E-modulus                          | 28        |
| 3.5 VARIATIE BREEDTE PLAAT                                         | 28        |
| 3.6 COMBINATIE-EFFECTEN                                            | 30        |
| 3.6.1 Combinatie 1: sterke toename momenten                        | 30        |
| 3.6.2 Combinatie 2 & 3: hoge verhouding $M_{rand}/M_{plaat}$       | 30        |
| 3.6.3 Combinatie 4: verminderen effecten parameters                | 31        |
| 3.6.4 Combinatie 5: sterke afname momenten                         | 31        |
| 3.6.5 Conclusie combinatie-effecten                                | 31        |
| 3.7 CONCLUSIE PARAMETERSTUDIE RECHT BRUGDEK                        | 32        |
| <b>4 INVLOED SCHEEFSTAND BRUGDEK</b>                               | <b>33</b> |
| 4.1 RESULTATEN VARIATIE DIKTE RANDSTROKEN                          | 33        |
| 4.2 VERGELIJKING RESULTATEN MET RECHT BRUGDEK                      | 34        |

|                  |                                                                          |           |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.3              | INVLOED VAN SCHEEFSTAND VOOR VERSCHILLENDE BELASTINGEN.....              | 35        |
| 4.4              | EFFECTEN VAN KLEINE VARIATIES IN DE DIKTE VAN DE RANDSTROKEN .....       | 37        |
| <b>5</b>         | <b>VERGELIJKING NORMBELASTING MET PROEFBELASTING .....</b>               | <b>38</b> |
| 5.1              | INVOER PROEFBELASTING IN MODEL .....                                     | 38        |
| 5.2              | VERGELIJKING MOMENTENVERDELINGEN .....                                   | 38        |
| <b>6</b>         | <b>CONTROLE MODEL MET MEETRESULTATEN BEPROEVING HALVEMAANSBRUG .....</b> | <b>41</b> |
| 6.1              | BEPALen VERPLAATSINGEN IN SCIA .....                                     | 41        |
| 6.2              | VERGELIJKING MEETWAARDEN MET RESULTATEN SCIA.....                        | 42        |
| 6.3              | CONCLUSIE CONTROLE MODEL IN SCIA.....                                    | 44        |
| <b>7</b>         | <b>CONCLUSIE &amp; AANBEVELINGEN .....</b>                               | <b>45</b> |
| <b>8</b>         | <b>DISCUSSIE .....</b>                                                   | <b>46</b> |
|                  | <b>LITERATUURLIJST .....</b>                                             | <b>47</b> |
| <b>BIJLAGE A</b> | <b>DOORSNEDEKRACHTEN EN SPANNINGEN IN EEN PLAAT .....</b>                | <b>48</b> |
| <b>BIJLAGE B</b> | <b>BELASTING.....</b>                                                    | <b>50</b> |
| B.1              | CONTROLE EIGENGEWICHT MODEL MET HANDBEREKENING .....                     | 50        |
| B.2              | BELASTING OP MODELLEN M2P EN M3P, VARIABEL AANTAL RIJSTROKEN .....       | 50        |
| <b>BIJLAGE C</b> | <b>RESULTATEN PARAMETERSTUDIE RECHT BRUGDEK .....</b>                    | <b>51</b> |
| C.1              | VARIATIE D_RAND; MOMENTENLIJNEN, TABEL .....                             | 51        |
| C.2              | VARIATIE E-MODULUS .....                                                 | 54        |
| C.3              | MOMENTENLIJNEN VARIATIE B_RAND .....                                     | 56        |
| C.4              | MOMENTENLIJNEN VARIATIE B_PLAAT.....                                     | 57        |
| C.5              | COMBINATIE PARAMETERS; MOMENTENLIJNEN, TABELLEN .....                    | 58        |
| <b>BIJLAGE D</b> | <b>RESULTATEN VARIATIE D_RAND SCHEEFSTAAND BRUGDEK .....</b>             | <b>61</b> |
| <b>BIJLAGE E</b> | <b>MEETRESULTATEN .....</b>                                              | <b>62</b> |

## SAMENVATTING

De Halvemaansbrug is een vlakkeplaatbrug met verhoogde zijranden, zogenaamde versterkte randstroken. Door deze versterkte randstroken is de krachtsverdeling in het brugdek complexer dan in een vlakkeplaatbrug zonder randstroken. Daarnaast staat het brugdek ten opzichte van de oevers scheef; hierdoor wordt de krachtsverdeling in het brugdek ook beïnvloed. Aangezien er nog veel onduidelijkheid is over de invloed van randstroken en scheefstand op de krachtsverdeling in het brugdek van de Halvemaansbrug, is dit brugdek onderzocht met behulp van een modellering in het eindige elementenmethode (EEM)-programma Scia Engineer.

Eerst is onderzocht door welke parameter de momentenverdeling in een recht brugdek met randstroken het meest wordt beïnvloed. Dit blijkt de dikte van de randstroken te zijn; in het brugdek van de Halvemaansbrug is het maximale moment maar liefst 60% groter dan in een brugdek zonder randstroken. Dit geldt bij belasting met de verkeersbelasting volgens NEN-EN 1991-2. De breedte van de randstroken en de breedte van het wegdek hebben veel minder invloed op de resulterende momentenverdeling.

Vervolgens is de dikte van de randstroken gevarieerd in een model van het scheefstaande brugdek, om te bepalen hoe groot de invloed is van de scheefstand van de Halvemaansbrug op de optredende momenten. Hieruit blijkt dat de scheefstand van een vlakke plaat zonder randstroken voor alle belastingsgevallen verwaarloosd kan worden. Bij belasting met uitsluitend het eigen gewicht kan scheefstand van een brugdek met randstroken ook worden verwaarloosd. Bij belasting met de voorgeschreven verkeersbelasting volgens NEN-EN 1991-2 wordt de invloed van scheefstand steeds groter naarmate de dikte van de randstroken toeneemt. De momenten in het scheefstaande brugdek van de Halvemaansbrug verschillen met 8% van de momenten die in een recht brugdek met randstroken optreden, bij belasting met de normbelasting. De invloed van deze scheefstand is echter veel kleiner vergeleken met de invloed van de hoogte van de randstroken.

In mei 2014 is de Halvemaansbrug beproefd, om iets meer duidelijkheid over het gedrag van dit brugdek te krijgen. Bij deze beproeving is de brug belast met een bepaalde proefbelasting, die is bedoeld als benadering voor de voorgeschreven verkeersbelasting volgens NEN-EN 1991-2. In hoeverre het effect van deze proefbelasting overeenkomt met het effect van de normbelasting op de krachtsverdeling in het brugdek, is echter niet duidelijk. Daarom is met dit onderzoek ook bepaald hoe groot het verschil is tussen de proefbelasting en de voorgeschreven verkeersbelasting wat betreft de resulterende momentenverdeling in de Halvemaansbrug. Dit is gedaan met behulp van een model van het brugdek van de Halvemaansbrug in het programma Scia Engineer, waarop de proefbelasting is gemodelleerd. Hieruit blijkt dat het voor de grootte en de plaats van optreden van het maximale moment in de randstroken nauwelijks verschil maakt of de normbelasting of de proefbelasting wordt gebruikt. Het verschil in grootte van de optredende momenten bedraagt 3%. Voor het maximale moment in de plaat maakt het wel verschil welke belasting er op het brugdek werkt. De momenten die bij beide belastingen optreden verschillen met 13% van elkaar, en treden op verschillende plaatsen in het brugdek op.

# 1 INLEIDING

De Halvemaansbrug is een vlakkeplaatbrug met één overspanning, die in het noorden van Alkmaar over de Hoornsevaart ligt. De brug maakt deel uit van de Herenweg en is uitsluitend bedoeld voor motorvoertuigen, sinds de aanleg van de 2<sup>e</sup> Halve Maansbrug die bestemd is voor fietsers en voetgangers. In onderstaande afbeelding is de Halvemaansbrug te zien, met daarnaast de 2<sup>e</sup> Halve Maansbrug.



FIGUUR 1.1 BOVENAANZICHT VAN DE HALVEMAANSBRUG. BRON: GOOGLE MAPS

Opvallend aan de Halvemaansbrug is dat het een vlakkeplaatbrug is met verhoogde zijranden, zogenaamde versterkte randstroken. Deze randstroken zijn geïntegreerd in het brugdek. Het probleem hierbij is dat de randstroken door deze integratie de krachtsverdeling in het brugdek beïnvloeden, waardoor de krachtsverdeling in de brug complexer wordt: door hun grotere stijfheid trekken de verhoogde randstroken een groter deel van de belasting naar zich toe dan de rest van de vlakke plaat. Dit leidt tot grotere momenten in de randstroken. Deze krachtsverdeling wordt beïnvloed door verschillende eigenschappen van de randstroken, zoals de dikte en breedte van de randstroken. Hoe groot de invloed is van zulke parameters op de krachtsverdeling in het brugdek, is echter niet duidelijk. Hierdoor kunnen er moeilijk aannames worden gemaakt bij het vereenvoudigen van de constructie voor berekeningen. Om helder te krijgen welke parameters belangrijk en welke te verwaarlozen zijn, moet hier onderzoek naar worden gedaan.

Ook staat de Halvemaansbrug scheef ten opzichte van de oevers, zoals in Figuur 1.1 te zien is. Deze scheefstand leidt ook tot het probleem dat de krachtsverdeling in het brugdek complexer is dan in een recht brugdek. Hoe groot het verschil is tussen de krachtsverdeling in het brugdek van de Halvemaansbrug en een recht brugdek, en of deze scheefstand verwaarloosd kan worden om de constructie te vereenvoudigen, is nog onduidelijk.

Daarnaast is de Halvemaansbrug recentelijk beproefd, om iets meer duidelijkheid over het gedrag van dit brugdek te krijgen. Tijdens de beproeving is de brug belast met een bepaalde proefbelasting. Deze proefbelasting komt niet overeen met de normbelasting die is voorgeschreven voor verkeersbelasting op een brug, maar is bedoeld als benadering voor deze normbelasting. Het is echter onduidelijk in hoeverre het effect van de proefbelasting op de krachtsverdeling in het brugdek verschilt van het effect van de normbelasting.

## 1.1 DOELSTELLING

Het eerste doel van dit onderzoek is bepalen door welke parameter de momentenverdeling in een brugdek met randstroken het meest wordt beïnvloed. Deze invloed wordt voor een recht brugdek gekwantificeerd.

Als tweede doel wordt bepaald hoe groot de invloed is van scheefstand op de optredende momenten in een brugdek met randstroken, door de optredende momenten in het scheefstaande brugdek van de Halvemaansbrug te vergelijken met de momenten in een recht brugdek, bij variatie van de belangrijkste parameter.

Het derde doel van dit onderzoek is bepalen hoe groot het verschil is tussen de proefbelasting en de voorgeschreven verkeersbelasting volgens NEN-EN 1991-2 wat betreft de resulterende momentenverdeling in de Halvemaansbrug.

## 1.2 STRUCTUUR

Met behulp van het EEM-programma Scia Engineer, hierna Scia genoemd, is een recht brugdek en het scheefstaande brugdek van de Halvemaansbrug gemodelleerd. In hoofdstuk 2 wordt dit modelleringsproces beschreven, en worden alle aannames die zijn gedaan met betrekking tot de opbouw van het model besproken.

Als eerste is een parameterstudie uitgevoerd met het model van een recht brugdek, waarbij de volgende parameters zijn gevarieerd:

- De dikte van de randstroken
- De E-modulus van de randstroken
- De breedte van de randstroken
- De breedte van het wegdek tussen de randstroken

Uit deze parameterstudie blijkt hoe groot de invloed van elke parameter is op de momentenverdeling in het brugdek. Deze resultaten zijn beschreven in hoofdstuk 3. Dit hoofdstuk eindigt met een conclusie waarin de belangrijkste resultaten worden genoemd, en waaruit blijkt welke parameter de grootste invloed heeft op de momentenverdeling in het brugdek.

Vervolgens is een parameterstudie uitgevoerd met het model van het scheefstaande brugdek van de Halvemaansbrug. In dit model is uitsluitend de parameter met de meeste invloed op de momentenverdeling gevarieerd. De resultaten hiervan zijn te vinden in hoofdstuk 4. Deze resultaten zijn vergeleken met de resultaten van de parameterstudie met het rechte brugdek. Hieruit blijkt welke invloed scheefstand van de brug heeft op de momentenverdeling in het brugdek, in combinatie met variatie van de belangrijkste parameter.

Bij het modelleren van de belasting op zowel de rechte als de scheefstaande brug is de norm voor verkeersbelasting van bruggen (NEN-EN 1991-2) aangehouden. In hoofdstuk 5 wordt deze voorgeschreven verkeersbelasting vergeleken met de belasting die tijdens de beproeving van de brug is gebruikt. Dit is gedaan met behulp van het model van het scheefstaande brugdek in Scia, waarop de belasting die tijdens de beproeving van de brug is gebruikt, is gemodelleerd. Door de momentenverdeling ten gevolge van beide belastingen te vergelijken, blijkt hoe groot het verschil is tussen de norm- en proefbelasting wat betreft de resulterende momenten in het brugdek.

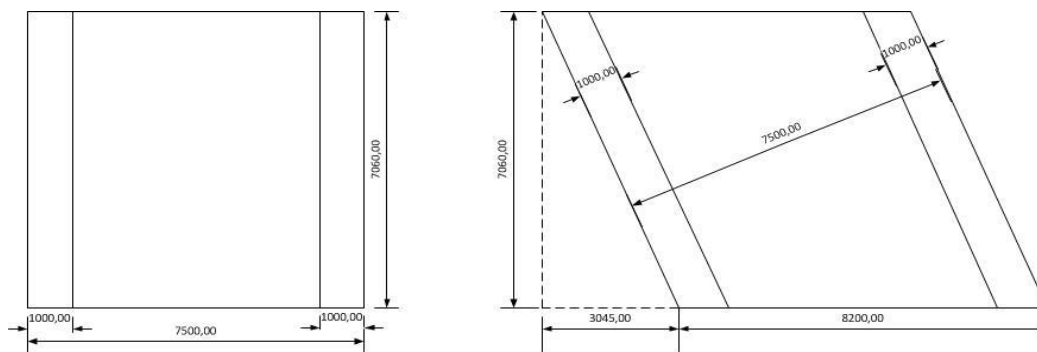
In hoofdstuk 6 is het model van de Halvemaansbrug gecontroleerd met behulp van meetresultaten die tijdens het beproeven van de brug zijn verkregen. Door de verplaatsingen van het brugdek die resulteren uit het model te vergelijken met de gemeten verplaatsingen van het brugdek, blijkt hoe groot de afwijking is van het model ten opzichte van de werkelijkheid. Na dit hoofdstuk volgt in hoofdstuk 7 de conclusie, waarin de doelstelling wordt beantwoord, en aanbevelingen worden gedaan met betrekking tot het vereenvoudigen van een scheefstaand brugdek met randstroken. Ten slotte volgt in hoofdstuk 8 de discussie.



## 2 MODELLERING VAN HET BRUGDEK IN SCIA

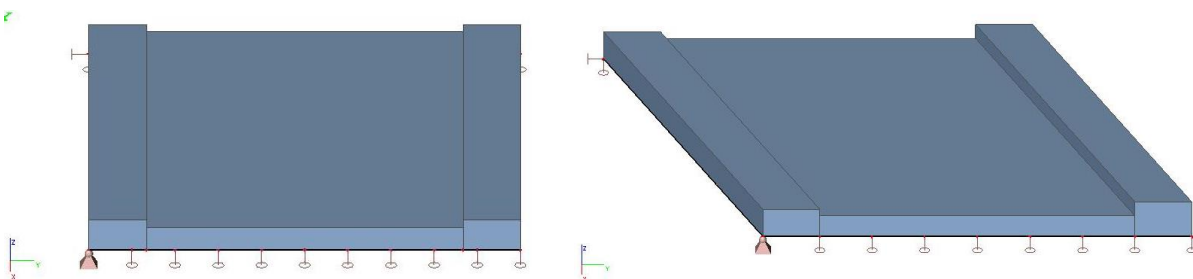
### 2.1 GEOMETRIE

Het brugdek is opgebouwd als een 2D-plaatmodel in Scia. Het brugdek bestaat uit een vlakke plaat, met een dikte van 450 mm. Op deze plaat zijn twee subregio's aangebracht met een variabele dikte, als randstroken. In werkelijkheid zijn deze randstroken 590 mm dik; ze steken dus 140 mm boven de plaat uit. De afmetingen van het rechte brugdek zijn bepaald aan de hand van de afmetingen van het werkelijke, scheefstaande brugdek. Het scheefstaande brugdek heeft in de richting van de overspanning een totale lengte van 7,06 m, deze lengte zal ook in het model van het rechte brugdek gebruikt worden. De breedte van het totale brugdek bedraagt 7,5 m, waarvan 1 meter aan beide zijden door de randstroken in beslag wordt genomen<sup>1</sup>. De breedte van de plaat tussen de randstroken bedraagt dus 5,5 m. De breedte van de plaat, de breedte van de randstroken en de dikte van de randstroken zullen in verschillende modellen van het rechte brugdek gevarieerd worden. In onderstaande afbeelding zijn de afmetingen van het rechte en het scheefstaande brugdek te zien.



FIGUUR 2.1 AFMETINGEN RECHT EN SCHEEFSTAAND BRUGDEK [MM], AAN BEIDE ZIJDEN LIGGEN DE RANDSTROKEN. RIJRICHTING IS VERTICAAL.

De randstroken zijn excentrisch gemodelleerd; dit betekent dat de onderkant van de randstroken op dezelfde hoogte ligt als de onderkant van de plaat. Op die manier zijn de randstroken alleen aan de bovenkant van het brugdek hoger dan het wegdek, zoals in werkelijkheid. Het rechte en scheefstaande gemodelleerde brugdek zien er als volgt uit:



FIGUUR 2.2: GEMODELLEERDE RECHTE (LINKS) EN SCHUINE (RECHTS) BRUGDEK, VAN VOREN (IN X-RICHTING) BEKEKEN

De gemiddelde betondruksterkte van het brugdek<sup>2</sup> bedraagt  $f_{cm} = 68 \text{ N/mm}^2$ . Dit komt overeen met de betonsoort C60/75<sup>3</sup>, dit is dan ook de betonsoort die gebruikt is in het model. In Scia is deze betonsoort als standaardmateriaal beschikbaar, alle eigenschappen van dit beton zijn in Scia volgens EN1992-2 voorgeprogrammeerd.

<sup>1</sup> Fennis, S.A.A.M. (2014). *Meetprotocol TU Delft voor proefbelasten Halvemaansbrug*.

<sup>2</sup> Ibid.

<sup>3</sup> Walraven, J.C., Fennis, S.A.A.M. (2013). *Dictaat CT2052/3150 Gewapend Beton*. Delft: TU Delft.

Voor de berekening van de optredende krachten in het brugdek in Scia is een eindige elementen-net gebruikt waarin de grootte van een 2D-element 0,2 m bedraagt. Met de standaardwaarde van 1 m waren de resultaten namelijk niet accuraat genoeg; het effect van de afzonderlijke puntlasten op de krachtsverdeling in de plaat was niet goed te zien. Met een elementgrootte van 0,2 m kan de krachtsverdeling in de plaat wel gedetailleerd genoeg worden berekend.

## 2.2 OPLEGGINGEN

In werkelijkheid is het brugdek van de Halvemaansbrug aan beide kanten over de gehele lengte opgelegd op kademuren. Het brugdek is niet momentvast aangelegd maar is wel vastgemetseld aan beide zijden.

Om te bepalen hoe deze oplegging het beste gemodelleerd kan worden, zijn hier verschillende mogelijkheden voor onderzocht. Voor elke mogelijkheid is gekeken naar de resulterende momentenlijn van het moment om de y-as (in de richting van de overspanning) ten gevolge van het eigen gewicht van de plaat, beschouwd in een doorsnede door het midden van de plaat, parallel aan de x-as. Dit is een doorsnede van de ene opgelegde zijde tot aan de andere opgelegde zijde. Op die manier is het effect van de verschillende opleggingen op de momentenverdeling in de plaat in beeld gebracht. Uiteindelijk is er voor een manier van opleggen gekozen die de werkelijkheid het beste benadert.

De verschillende mogelijkheden voor het opleggen van de plaat worden hieronder kort besproken. Hierbij wordt verplaatsing in de x-, y- en z-richting als  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$  genoteerd, en rotatie om de x-, y- en z-as als  $rx$ ,  $ry$  en  $rz$ . Er wordt gebruik gemaakt van het globale coördinatenstelsel, dat telkens linksonder in de figuren is weergegeven.

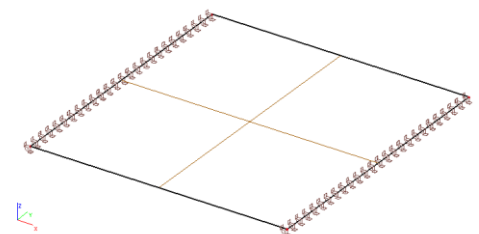
### 2.2.1 MOGELIJKE OPLEGGINGEN

#### LIJNOPLEGGINGEN

In Scia is het mogelijk om voor een lijnoplegging te kiezen die over de gehele rand werkt. De eigenschappen van de lijnoplegging zijn over de hele rand gelijk. Voor de lijnoplegging die onderzocht is, geldt het volgende:

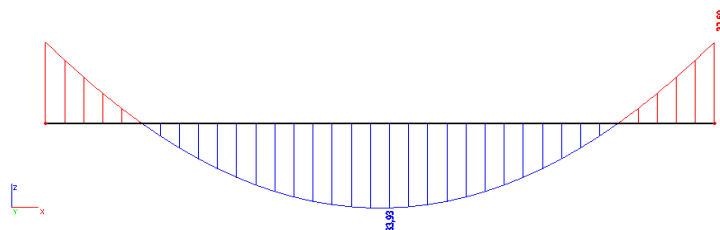
- Rotatie is in alle richtingen mogelijk
- Verplaatsing in de x, y en z-richting is niet mogelijk.

In Figuur 2.3 is een plaat met aan beide kanten een lijnoplegging weergegeven.



FIGUUR 2.3 LIJNOPLEGGINGEN AAN BEIDE KANTEN VAN DE PLAAT

Deze lijnoplegging leidt tot de volgende momentenverdeling in het midden van de plaat, in x-richting:



FIGUUR 2.4 MOMENTENLIJN IN X-RICHTING TEN GEVOLGE VAN HET EIGEN GEWICHT VAN DE PLAAT, BIJ EEN LIJNOPLEGGING [KNM/M]. MAX. MOMENTEN: + 34 KNM/M, -33 KNM/M

Uit de resulterende momentenverdeling blijkt dat het vastzetten van de verplaatsing in alle richtingen bij een lijnoplegging leidt tot een soort momentvaste oplegging, hoewel rotatie in alle richtingen wel mogelijk is. Blijkbaar veroorzaakt het vastzetten van alle verplaatsingen grote negatieve momenten bij de opleggingen.

Er wordt aangenomen dat het brugdek in werkelijkheid niet momentvast is opgelegd, het metselwerk waarmee het brugdek is vastgemetseld kan namelijk geen grote momenten aan. Door de grote momenten die hier aan de rand van de plaat ontstaan, blijken lijnopleggingen niet tot een realistische modellering van het brugdek te leiden.

## PUNTOPLEGGINGEN

Een andere methode voor het opleggen van de plaat is het gebruiken van losse puntopleggingen over de gehele lengte van de randen. Op die manier wordt een lijnoplegging gesimuleerd, maar kan elke puntoplegging aparte eigenschappen hebben. Aan beide kanten zijn 10 puntopleggingen verdeeld over de randen, elke 0,75 m wordt de plaat ondersteund. Er zijn drie mogelijkheden onderzocht voor het gebruik van deze puntopleggingen, die hieronder zullen worden beschreven.

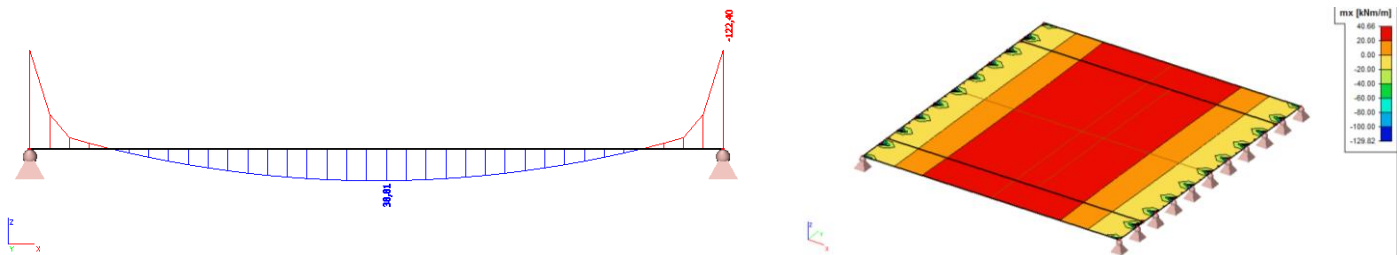
### Puntoplegging 1

Voor deze oplegging geldt het volgende:

- Verplaatsing in de x- y- en z-richting is niet mogelijk
- Rotatie in alle richtingen is wel mogelijk

Alle opleggingen zijn dus als scharnieren gemodelleerd. Op deze manier is de plaat gemodelleerd alsof er volledige wrijving is tussen de plaat en de ondergrond waarop de plaat is opgelegd; de plaat kan aan de randen niet in de x- en y-richting bewegen.

In onderstaande figuren is de resulterende momentenlijn weergegeven in de x-richting en het momentenverloop over de hele plaat bij deze oplegging, ten gevolge van uitsluitend het eigen gewicht van de plaat.



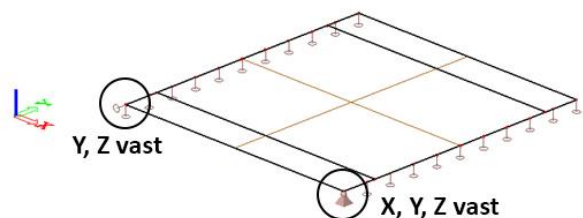
FIGUUR 2.5 MOMENTENVERLOOP IN HET MIDDEN VAN DE PLAAT IN X-RICHTING EN MOMENTENVERDELING OVER DE GEHELE PLAAT TEN GEVOLGE VAN HET EIGEN GEWICHT VAN DE PLAAT [KNM/M]. MAX. MOMENTEN = +39 KNM/M, -122 KNM/M

Bij deze manier van opleggen blijken er zeer grote momenten te ontstaan precies boven de opleggingen, die driemaal zo groot zijn als het maximale moment in het midden van de plaat. Het moment in het midden van de plaat is even groot als bij het gebruik van lijnopleggingen. De grote momenten wordt deels veroorzaakt door het gebruik van een eindige elementen-methode voor de berekening waardoor er pieken ontstaan in de momentenverdeling, maar zelfs als deze afgevlakt zouden worden blijven er relatief grote momenten ontstaan in de randen van de plaat. Zoals al eerder geconstateerd is, kan het metselwerk bij de randen zulke grote momenten niet aan en is deze manier van opleggen daarom geen realistische benadering voor de oplegging van het brugdek.

### Puntoplegging 2

Voor deze oplegging geldt het volgende:

- In elke oplegging is verplaatsing in de x- en y-richting mogelijk, behalve in twee punten
- Rotatie is in alle richtingen mogelijk

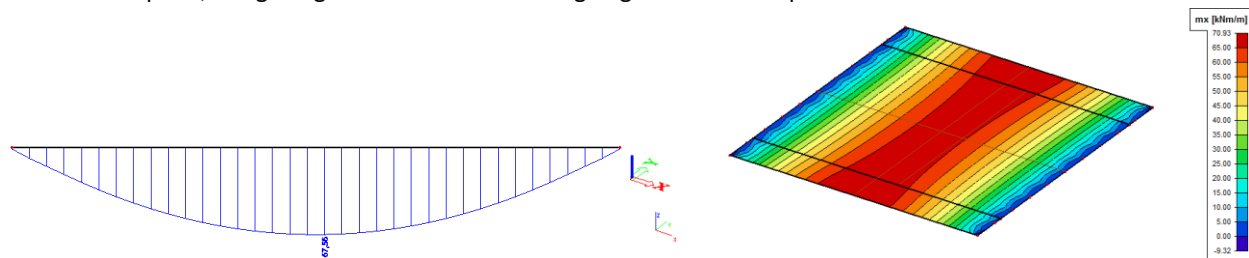


FIGUUR 2.6 PUNTOPLEGGING 2

Alle opleggingen zijn hier dus rolopleggingen, alleen in de z-richting is geen beweging mogelijk. Om de plaat wel plaatsvast te maken, zijn er op twee hoekpunten tegenover elkaar een ander type oplegging geplaatst: één van deze opleggingen is in de x, y en z-richting vastgezet, hier is uitsluitend rotatie mogelijk. De andere oplegging is alleen in de y- en z-richting vastgezet, hier is wel beweging mogelijk in de x-richting. Zie ook Figuur 2.6. Zo wordt draaien en verplaatsing van de plaat in het x-y-vlak voorkomen.

Op deze manier is de plaat gemodelleerd alsof er helemaal geen wrijving is tussen de plaat en de ondergrond waarop de plaat is opgelegd; de plaat kan aan de randen vrij in de x- en y-richting bewegen.

In onderstaande figuren is de resulterende momentenlijn weergegeven in de x-richting en het momentenverloop over de hele plaat, ten gevolge van uitsluitend het eigen gewicht van de plaat.



FIGUUR 2.7 MOMENTENVERLOOP IN HET MIDDEN VAN DE PLAAT IN X-RICHTING EN MOMENTENVERDELING OVER DE GEHELE PLAAT TEN GEVOLGE VAN HET EIGEN GEWICHT VAN DE PLAAT, BIJ PUNTOPLEGGING 2 [KNM/M]. MAX. MOMENTEN = +68 KNM/M, -9 KNM/M

Uit bovenstaande figuren blijkt dat deze manier van opleggen ertoe leidt dat er nauwelijks momenten meer zijn ter plaatse van de opleggingen, en dat het moment in het midden tweemaal zo groot is als bij de situatie met lijnopleggingen en scharnier-puntopleggingen. Door het ontbreken van grote momenten bij de randen lijkt deze oplegging al realistischer. In werkelijkheid ligt het brugdek echter niet los op de ondergrond en is vrije beweging in de x- en y-richting door de vastgemetselde randen niet geheel mogelijk.

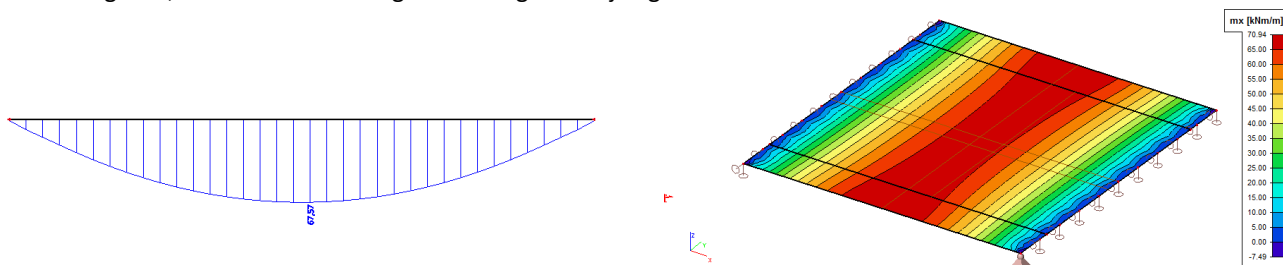
### Puntoplegging 3

Voor deze oplegging geldt het volgende:

- Verplaatsing is in de y- en z-richting niet mogelijk, in één punt is verplaatsing in de x-richting ook niet mogelijk
- Rotatie is in elke richting mogelijk

Deze oplegging komt vrijwel overeen met puntoplegging 2, zie Figuur 2.6. Het enige verschil is dat verplaatsing in zowel de y- als z-richting hier voor elk punt is vastgezet, verplaatsing in de x-richting is overal mogelijk behalve in één hoekpunt om de constructie plaatsvast te maken. Dit is hetzelfde hoekpunt als bij oplegging 2.

Op deze manier is de plaat gemodelleerd alsof er in de y-richting volledige wrijving is tussen de plaat en de ondergrond, en er in de x-richting helemaal geen wrijving is.



FIGUUR 2.8 MOMENTENVERLOOP IN HET MIDDEN VAN DE PLAAT IN X-RICHTING EN MOMENTENVERDELING OVER DE GEHELE PLAAT TEN GEVOLGE VAN HET EIGEN GEWICHT VAN DE PLAAT, BIJ PUNTOPLEGGING 3 [KNM/M]. MAX. MOMENTEN = +68 KNM/M, -7 KNM/M

Het momentenverloop in x-richting komt overeen met het momentenverloop ten gevolge van puntoplegging 2 (vrij in x- en y-richting). Daarnaast is er geen sprake van bijzonder grote momenten net boven de opleggingen zoals bij puntoplegging 1, omdat beweging in de x-richting nu wel mogelijk is. Gevolgen van het vastzetten van de plaat in de y-richting zijn niet te zien, maar wellicht dat deze gevolgen bij een andere belasting, zoals een puntlast, wel te zien zijn. Door het ontbreken van grote momenten bij de randen lijkt deze oplegging net als puntoplegging 2 vrij realistisch, in werkelijkheid ligt het brugdek echter niet geheel vast in de y-richting en geheel los in de x-richting.

### 2.2.2 KEUZE OPLEGGING

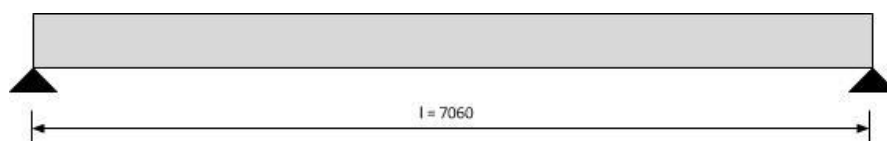
Uiteindelijk is er voor gekozen om puntoplegging 2 te gebruiken in het model van het brugdek. Wegens de grote momenten bij de randen bleken een lijnoplegging en puntoplegging 1 niet realistisch te zijn; het metselwerk aan de randen van het brugdek zou deze grote momenten niet aankunnen. Een oplegging waarbij het moment (bijna) 0 is bij de randen, zoals puntoplegging 2 of 3, past beter bij de ingemetselde randen.

Met de keuze voor puntoplegging 2 is ervoor gekozen om de wrijving die het metselwerk veroorzaakt in de x- en y-richting te verwaarlozen. Het volledig vastzetten van de verplaatsing in zowel de x- als de y-richting bleek niet realistisch in verband met het ontstaan van grote momenten. Het vastzetten van het model in uitsluitend de y-richting terwijl verplaatsing in de x-richting nog volledig mogelijk is, is ook niet realistisch en zou niet consequent zijn: het brugdek is in beide richtingen in bepaalde mate vastgezet, maar is niet veel meer ingemetseld in de y-richting dan in de x-richting. Bij dit model wordt dus aangenomen dat het brugdek in zowel de x- als de y-richting geen wrijving ondervindt, en wordt de eventuele weerstand van het metselwerk op het brugdek verwaarloosd.

Een alternatieve manier om dit probleem op te lossen zou het gebruik zijn van veren als ondersteuning in x- en y-richting om een bepaalde mate van wrijving te simuleren. Hier zal echter niet verder op in worden gegaan bij dit onderzoek.

### 2.2.3 PLAATS OPLEGGING

Op de plattegrond van de Halvemaansbrug in het meetprotocol<sup>1</sup> is het moeilijk te zien door welk oppervlakte het brugdek precies ondersteund wordt aan beide kades. Daarom is in het model als afstand tussen beide opleggingen de lengte van de overspanning aangenomen, zie Figuur 2.9. Om de opleggingen op een betere manier te kunnen modelleren, zou meer in detail gekeken moeten worden naar het oppervlakte waardoor het brugdek ondersteund wordt. Als dit ondersteuningsoppervlakte bekend is, kan de effectieve overspanningslengte worden bepaald waarin een deel van het ondersteuningsoppervlakte wordt meegenomen, volgens NEN-EN 1992-1-1<sup>2</sup>. De overspanningslengte zou dan iets groter worden. Hiervoor zou echter eerst bepaald moeten worden hoe groot het ondersteuningsoppervlakte precies is, en welke oppervlakte van het brugdek is vastgemetseld aan de kade. Dit is bij dit onderzoek buiten beschouwing gelaten. In een vervolgonderzoek zou hier echter naar gekeken kunnen worden, en zou kunnen worden onderzocht welke invloed het vergroten van de overspanning heeft op momenten in een brugdek met randstroken.



FIGUUR 2.9 PLAATS OPLEGGING IN MODEL [MM]

<sup>1</sup> Fennis, S.A.A.M. (2014). *Meetprotocol TU Delft voor proefbelasten Halvemaansbrug*.

<sup>2</sup> NEN-EN 1992-1-1+C2 (2011). Eurocode 2: Ontwerp en berekening van betonconstructies - Deel 1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen NEN.

## 2.3 BELASTING

De belasting op het model van het brugdek is opgebouwd uit verschillende belastingsgevallen:

- Eigen gewicht (permanent), automatisch berekend in Scia
- Voorgeschreven verkeersbelasting op bruggen volgens NEN-EN 1991-2<sup>1</sup>, bestaande uit:
  - o Verdeelde belasting (variabel)
  - o Aslasten (variabel)

### 2.3.1 BEPALING VERKEERSBELASTING VOLGENS NORM

Voor de verkeersbelasting op de Halvemaansbrug wordt alleen belastingsmodel 1 (LM1) uit NEN-EN 1991-2 in rekening gebracht. Dynamische belastingen (LM2) worden bij dit onderzoek namelijk buiten beschouwing gelaten, en er is geen sprake van uitzonderlijke belastingen en voertuigen (LM3) of belasting door een uitzonderlijk grote mensenmenigte (LM4).

Belastingsmodel 1 bestaat uit twee deelsystemen:

1. **Geconcentreerde dubbele aslasten** (tandemstelsel: TS), waarbij de belasting per as wordt gegeven door:

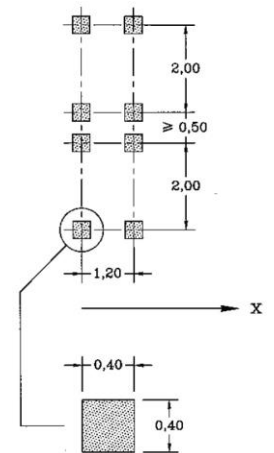
$$\alpha_Q \cdot Q_k$$

waarbij  $\alpha_Q$  een correctiefactor is.

Daarnaast moeten de dubbele aslasten volgens NEN-EN 1991-2 aan het volgende voldoen<sup>2</sup>:

- De verplaatsing van een tandemstelsel behoort centrisch langs de as van de rijstrook te zijn aangenomen
- Per rijstrook behoort niet meer dan 1 tandemstelsel in rekening te zijn gebracht
- Iedere as van het tandemstelsel behoort met twee identieke wielen in rekening te zijn gebracht, de wielbelasting wordt daarmee gelijk aan  $0,5 \alpha_Q Q_k$  per wiel
- Voor het contactoppervlak van ieder wiel behoort te zijn uitgegaan van een vierkant met zijden van 0,4 m.

In Figuur 2.10 staat deze belasting geïllustreerd.



FIGUUR 2.10 GECONCENTREERDE DUBBELE ASLASTEN. BRON: NEN-EN 1991-2

2. **Gelijkmatig verdeelde belastingen** (UDL stelsel), met de volgende belasting per vierkante meter theoretische rijstrook:

$$\alpha_q \cdot q_k$$

De gelijkmatig verdeelde belastingen behoren volgens NEN-EN 1991-2 alleen op de ongunstige delen van het invloedsvlak te zijn toegepast, zowel in lengte- als in dwarsrichting. In het geval van de Halvemaansbrug is dit het gehele oppervlakte van het wegdek.

Voor beide deelsystemen zijn karakteristieke waarden gegeven voor de belasting per rijstrook  $Q_k$  en  $q_k$ ; zie ook Tabel 2.1. De waarde van de correctiefactoren  $\alpha_Q$  en  $\alpha_q$  kan verminderd worden volgens de bijlage bij NEN-EN 1991-2, als er een nadere specificatie geldt voor het te verwachten verkeer op de brug. Een dergelijke specificatie is niet te vinden voor het verkeer op de Halvemaansbrug, dus in principe zou een waarde van 1 aangehouden moeten worden voor deze correctiefactoren. In een opmerking in de norm (opmerking 2, paragraaf 4.3.2.)<sup>3</sup> wordt echter genoemd dat als de  $\alpha$ -factoren “gelijk aan 1 worden genomen, dan komt dit overeen met een verkeerssituatie met zwaar, industrieel, internationaal verkeer, met een groot aandeel van zware voertuigen in het totale verkeer. Voor meer gebruikelijke verkeerssamenstellingen (rijkswegen en autosnelwegen) kan, voor het

<sup>1</sup> NEN-EN 1991-2+C1:2011. (2011). Eurocode 1: Belastingen op constructies – Deel 2: Verkeersbelasting op bruggen NEN.

<sup>2</sup> Ibid.

<sup>3</sup> Ibid.

*tandemstelsel en de gelijkmatig verdeelde belasting van rijstrook 1, een beperkte reductie op de  $\alpha$ -factoren worden toegepast (10 tot 20%)."*

Aangezien de Herenweg een weg is in de bebouwde kom met een snelheidslimiet van 50 km/u, waar de gemeente grote verkeersdruk probeert te bestrijden en een maximum van 5000 motorvoertuigen per dag nastreeft<sup>1</sup>, wordt aangenomen dat hier geen sprake is van zwaar, industrieel, internationaal verkeer maar van een gebruikelijke verkeerssamenstelling. Daarom wordt een beperkte reductie op de  $\alpha$ -factoren toegepast van 10%:

$$\alpha_Q = 0,9 \quad \alpha_q = 0,9$$

Deze gereduceerde factoren gelden voor het tandemstelsel en de gelijkmatig verdeelde belasting van rijstrook 1. Voor de andere rijstroken wordt  $\alpha = 1$  aangehouden.

In onderstaande tabel staat een overzicht van de verkeersbelastingen die in rekening moeten worden gebracht voor de twee deelsystemen. Voor belasting op de Halvemaansbrug worden rijstrook 1 en 2 in rekening gebracht.

TABEL 2.1 GROOTTE VERKEERSBELASTING VOLGENS NEN-EN 1991-2

| Positie                | Karakteristieke waarde aslast $Q_k$ (kN) | Karakteristieke waarde verdeelde belasting $q_k$ (kN/m <sup>2</sup> ) | Correctiefactoren $\alpha_Q, \alpha_q$ | Grootte aslast – belasting per wiel $0,5 * Q_k * \alpha_Q$ (kN) | Gelijkmatig verdeelde belasting $\alpha_q * q_k$ (kN/m <sup>2</sup> ) |
|------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| <b>Rijstrook nr. 1</b> | 300                                      | 9                                                                     | 0,9                                    | <b>135</b>                                                      | <b>8,1</b>                                                            |
| <b>Rijstrook nr. 2</b> | 200                                      | 2,5                                                                   | 1                                      | <b>100</b>                                                      | <b>2,5</b>                                                            |
| <b>Rijstrook nr. 3</b> | 100                                      | 2,5                                                                   | 1                                      | <b>50</b>                                                       | <b>2,5</b>                                                            |

Op deze belastingen moeten ook belastingsfactoren in rekening worden gebracht. Volgens de Richtlijnen Beoordeling Kunstwerken, opgesteld door Rijkswaterstaat in 2013, behoort voor een bestaande brug voor het eigen gewicht een belastingsfactor van 1,15 in rekening te worden gebracht, en voor de verkeersbelasting een factor van 1,25. Deze belastingsfactoren zijn toegevoegd als weegfactoren in Scia.

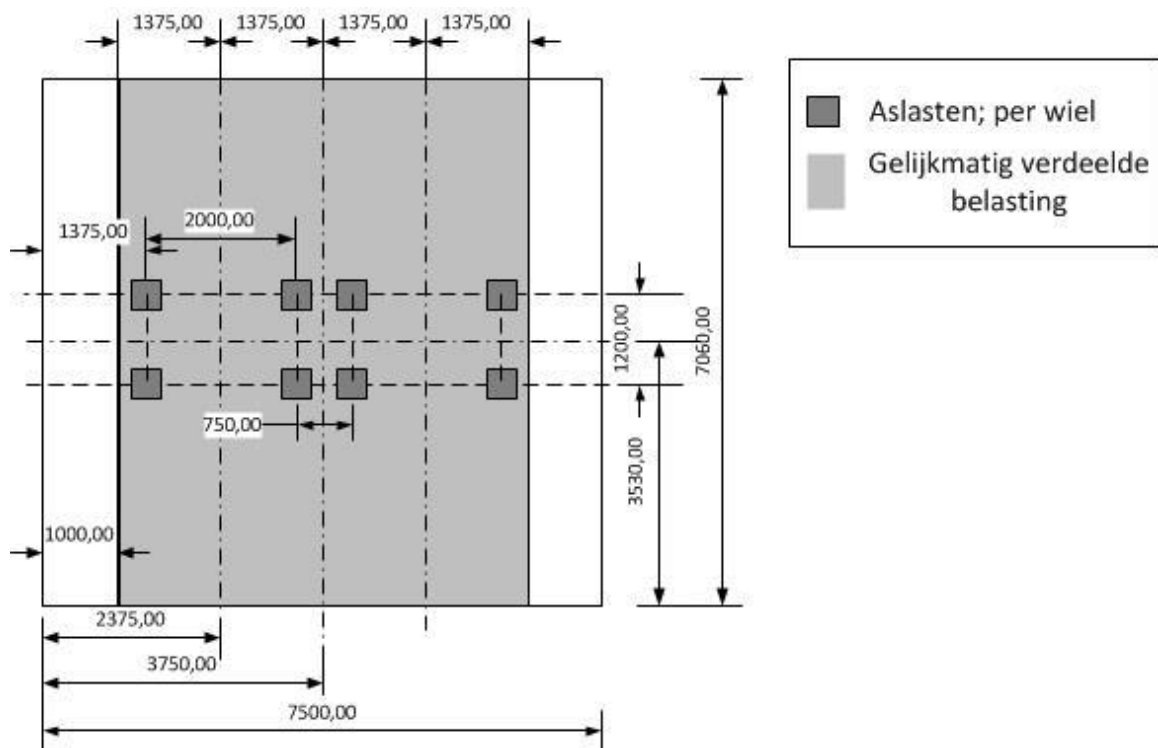
### 2.3.2 INVOER BELASTINGEN IN SCIA

De verkeersbelasting, bestaande uit aslasten en een verdeelde belasting, en het eigen gewicht, zijn als aparte belastingsgevallen gemodelleerd in Scia, en vervolgens gecombineerd tot één belastingscombinatie waarin ook de belastingsfactoren zijn meegenomen. Op deze manier kunnen de belastingsgevallen zowel apart van elkaar als gecombineerd op het gemodelleerde brugdek worden gezet.

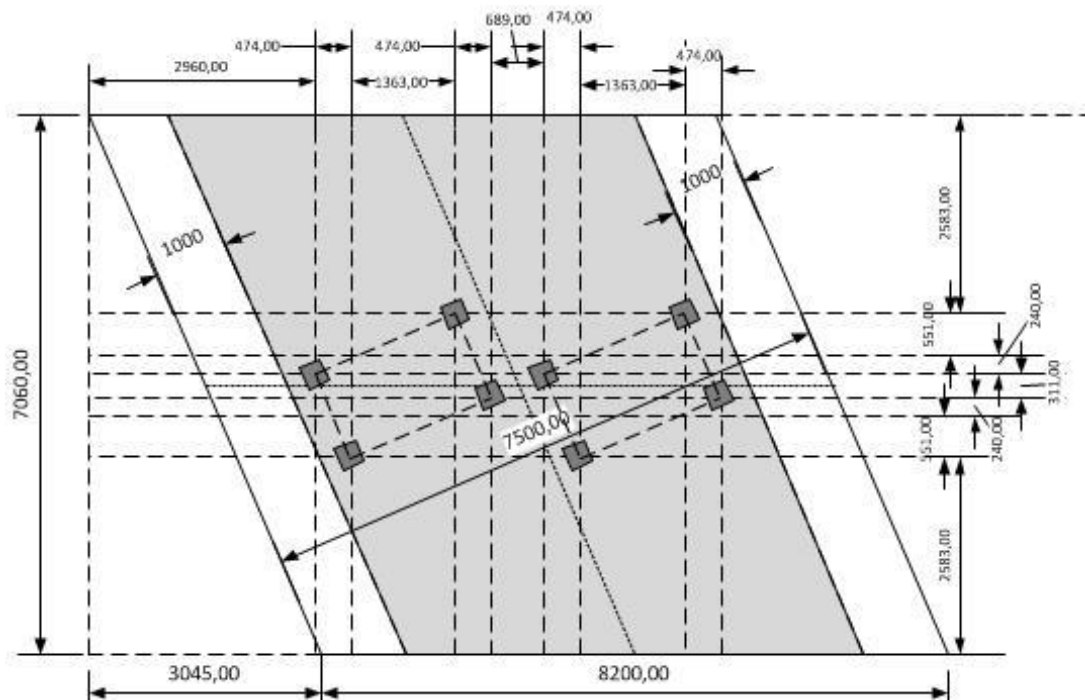
Om te controleren of het eigen gewicht dat in Scia automatisch toegevoegd wordt wel klopt en of de waarden in de resulterende momentenverdeling enigszins realistisch zijn, is er met een handberekening onderzocht hoe groot het maximale moment in de plaat zou moeten zijn, ten gevolge van uitsluitend het eigen gewicht. Deze handberekening is te vinden in Bijlage B, B.1. Uit deze berekening blijkt dat het maximale moment in de plaat 70,09 kNm/m zou moeten bedragen. In Scia bedraagt het maximale moment ten gevolge van het eigen gewicht 70,93 kNm/m, deze waarde komt vrijwel overeen met de berekende waarde. Er kan dus aangenomen worden dat het eigen gewicht op een juiste manier is gemodelleerd.

In Figuur 2.11 en Figuur 2.12 is de locatie van de verschillende belastingen weergegeven op het rechte en het scheefstaande brugdek. Zoals in NEN-EN 1991-2 voorgeschreven staat, is er per rijstrook 1 tandemstelsel (TS) in rekening gebracht, bestaande uit 2 x 2 wiellasten. Dit tandemstelsel staat centrisch op de as van de rijstrook. Het middelpunt van elk tandemstelsel ligt in het midden van de overspanning, zodat deze lasten voor een maximaal moment zorgen in het brugdek. Aangezien er twee rijstroken zijn, is er sprake van tandemstelsel 1 (TS1), met een grootte van 135 kN per wiel (links in de afbeeldingen), en tandemstelsel 2 (TS2), met een grootte van 100 kN per wiel (rechts in de afbeeldingen).

<sup>1</sup> van Engelen, L. (2011, 12 januari). Herenweg houdt beweegbare paal, *Noordhollands Dagblad*. Bezocht op 10 september, 2014, van <http://www.noordhollandsdagblad.nl/stadstreek/alkmaar/article5847521.ece>



FIGUUR 2.11 LOCATIE VERKEERSBELASTINGEN OP RECHT BRUGDEK [MM]



FIGUUR 2.12 LOCATIE VERKEERSBELASTINGEN OP SCHEEFSTAAND BRUGDEK [MM]

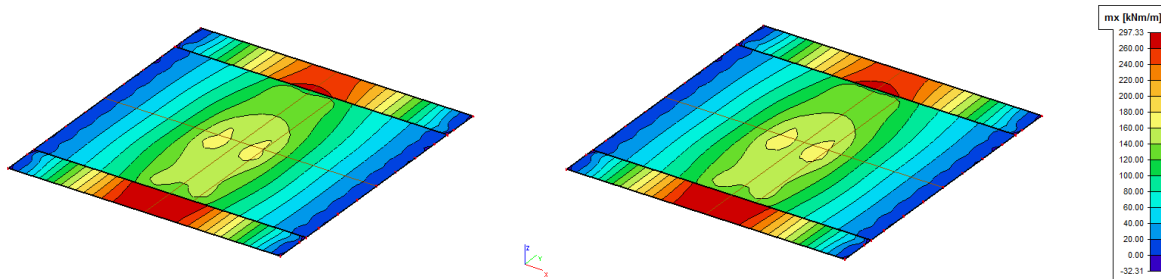
#### MODELLEREN ASLASTEN ALS PUNTLASTEN

De aslasten zijn in het model gemodelleerd als puntlasten, terwijl de aslasten volgens NEN-EN 1991-2 eigenlijk verdeeld zou moeten worden over een contactoppervlakte van 0,4 m bij 0,4 m per wiel. Het modelleren van de aslasten als puntlasten is namelijk veel eenvoudiger in Scia. Voordat deze vereenvoudiging is gemaakt, is er



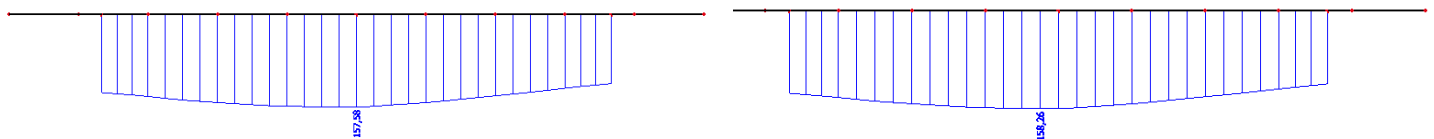
onderzocht hoe groot het verschil is tussen het modelleren van de aslasten als puntlasten en als verdeelde belasting over een klein oppervlakte (0,4 x 0,4 m), met betrekking tot de resulterende momentenverdelingen. Op basis van de grootte van dit verschil is bepaald of het effect van het spreiden van de lasten verwaarloosd kan worden.

De belastingen zijn telkens geplaatst op een rechte plaat met randstroken van 590 mm dik. In onderstaande figuren zijn de momentenverdelingen te zien ten gevolge van uitsluitend aslasten; gemodelleerd als puntlast (links) en als verdeelde belasting over 0,4 x 0,4 m (rechts):

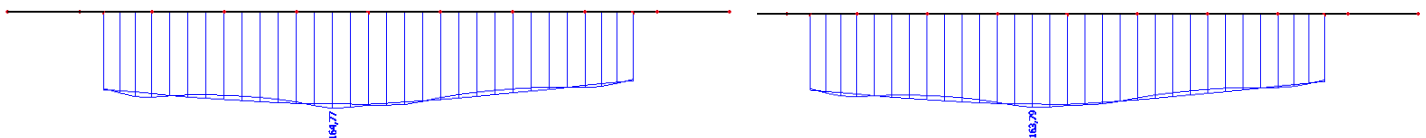


FIGUUR 2.13 MOMENTENVERDELINGEN TEN GEVOLGE VAN ASLASTEN, GEMODELLEERD ALS PUNTLAST (LINKS) EN ALS VERDEELDE BELASTING (RECHTS)

In de momentenverdelingen zijn vrij weinig verschillen te zien. Om het precieze verschil in momenten te onderzoeken, is gekeken naar het momentenverloop in het midden van de plaat en recht onder een van de aslasten, beide in een doorsnede parallel aan de y-as, ten gevolge van de aslasten. Het momentenverloop in de randstroken is in deze doorsneden niet weergegeven.



FIGUUR 2.14 MOMENTENVERLOOP IN Y-RICHTING, T.G.V. ASLASTEN ALS PUNTLAST (LINKS) EN ALS VERDEELDE BELASTING (RECHTS), IN DE MIDDENDOORSNEDE VAN DE PLAAT. MAX. MOMENT LINKS = 157,6 KNM/M, MAX. MOMENT RECHTS = 158,3 KNM/M



FIGUUR 2.15 MOMENTENVERLOOP IN Y-RICHTING, T.G.V. ASLASTEN ALS PUNTLAST (LINKS) EN ALS VERDEELDE BELASTING (RECHTS), ZOWEL IN DE MIDDENDOORSNEDE VAN DE PLAAT ALS RECHT ONDER EEN VAN DE ASLASTEN. MAX. MOMENT ONDER PUNTLAST = 164,8 KNM/M, MAX. MOMENT ONDER VERDEELDE BELASTING = 163,8 KNM/M.

Zoals in bovenstaande figuren te zien is, is er nauwelijks verschil tussen de resulterende momenten bij het modelleren van de aslasten als puntlasten of als verdeelde belasting over een klein oppervlakte. Het maximale moment in de middendoorsnede van de plaat wordt iets groter bij het verspreiden van de belasting over een klein oppervlakte, dit verschil is 0,4%. Het maximale moment onder de aslasten wordt iets kleiner bij het spreiden van de belasting t.o.v. belasting met puntlasten, de kracht wordt dan immers niet meer op 1 punt geconcentreerd waardoor het moment ter plaatse van de belasting afneemt. Het verschil bedraagt hier 0,6%.

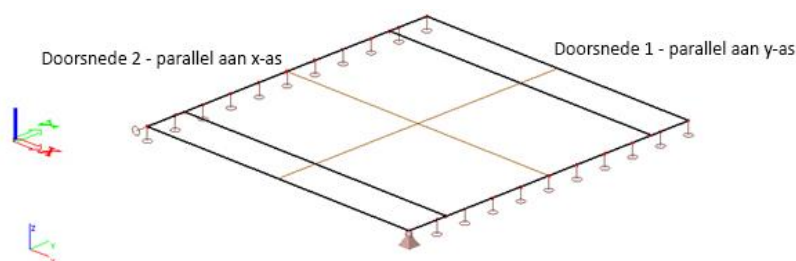
Aangezien de verschillen tussen de twee manieren van belasten zo gering zijn, worden de aslasten in dit onderzoek als puntlasten gemodelleerd in plaats van als verdeelde belasting over 0,4 x 0,4 m. De invloed van het verspreiden van de last over een contactoppervlakte wordt hierbij verwaarloosd.

## 2.4 BEREKENING EN WEERGAVE MOMENTENVERDELING

Bij de parameterstudies wordt telkens gekeken naar de momentenverdeling in de richting van de overspanning, dus naar de momenten om de y-as. In Scia wordt dit moment genoteerd als  $m_x$ , en gegeven per eenheid van breedte: kNm/m. Een uitgebreide beschrijving van alle gebruikte definities in Scia is gegeven in Bijlage A. In het vervolg van dit rapport wordt uitsluitend naar  $m_x$  gekeken, en is de notatie  $m_x$  vervangen door  $M$ . Dit moment is positief als er sprake is van trekspanning aan de onderzijde van de plaat.

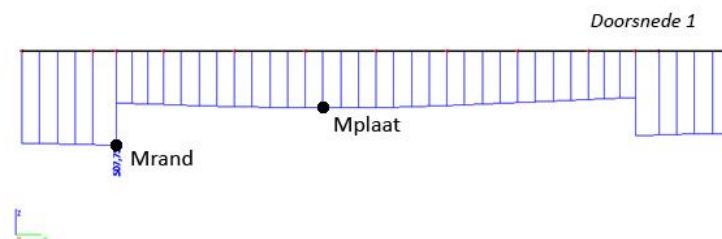
### 2.4.1 MOMENTEN IN HET RECHTE BRUGDEK

In het rechte brugdek zijn twee doorsneden door het midden van de plaat gemaakt, waarin het momentenverloop wordt beschouwd: Doorsnede 1, die parallel aan de y-as loopt en het verschil in momenten toont tussen de plaat en de randstroken, en doorsnede 2, die parallel aan de x-as loopt in het midden van de plaat en het momentenverloop tussen de twee opleggingen toont. De twee doorsneden zijn te zien in onderstaande figuur.



FIGUUR 2.16 DOORSNEDEN IN X- EN Y-RICHTING WAARIN HET MOMENTENVERLOOP WORDT WEERGEGEVEN

Bij het variëren van de verschillende parameters zijn telkens het maximale moment in de plaat,  $M_{\text{plaat}}$ , en het maximale moment in de randstrook,  $M_{\text{rand}}$ , beschouwd. Het maximale moment in de randstrook treedt op in het midden van de overspanning, in doorsnede 1, in de randstrook aan de kant van de rijstrook die het meeste belast wordt bij belasting met de normbelasting. Bij belasting door uitsluitend eigen gewicht, is het maximale moment in beide randstroken gelijk. Voor het maximale moment in de plaat is gekeken naar het maximale moment dat optreedt in doorsnede 1, in het deel van de plaat dat tussen de twee randstroken ligt. Dit maximale moment treedt bij belasting met de normbelasting iets naast het midden op, ook aan de kant van de rijstrook met de meeste belasting. Bij belasting door eigen gewicht treedt het maximale moment in het midden van doorsnede 1 op. In onderstaande figuur is aangegeven waar  $M_{\text{plaat}}$  en  $M_{\text{rand}}$  precies optreden in doorsnede 1, bij belasting met de normbelasting en het eigen gewicht.



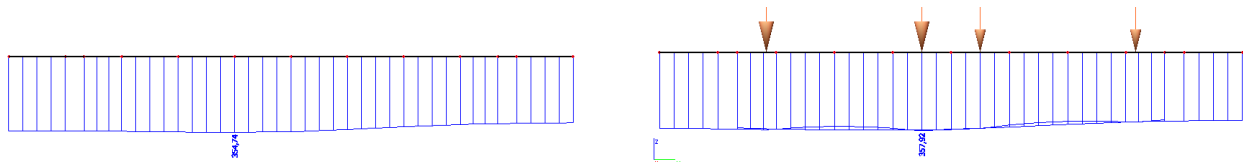
FIGUUR 2.17 LOCATIE VAN  $M_{\text{rand}}$  EN  $M_{\text{plaat}}$ , BIJ BELASTING MET DE NORMBELASTING EN HET EIGEN GEWICHT. AAN DE LINKERKANT LIGT DE RIJSTROOK DIE HET ZWAARST WORDT BELAST.

#### AANNAME PLAATS VAN OPTREDEN MAX. MOMENT IN DE PLAAT

In werkelijkheid treedt het maximale moment in de plaat in het model niet op in het midden van de overspanning, maar onder of rondom een van de puntlasten in het model. Om te zien of er voor het maximale moment in de plaat toch gekeken kan worden naar het moment dat in het midden van de overspanning, in doorsnede 1, optreedt, is onderzocht in hoeverre dit moment afwijkt van het maximale moment onder de puntlast. In het geval dat dit verschil minder dan 10% bedraagt, is dit verschil te verwaarlozen en kan er naar het maximale moment in het midden van de overspanning worden gekeken voor zowel de randstroken als de plaat. Dit vereenvoudigt het

onderzoek, aangezien er dan telkens maar naar één doorsnede gekeken hoeft te worden, in plaats van dat er telkens gezocht moet worden naar het maximale moment in de gehele plaat.

In onderstaande figuur is het momentenverloop te zien in een plaat zonder randstroken, belast met de normbelasting en het eigen gewicht van het brugdek, in zowel het midden van de plaat (doorsnede 1) als onder de puntlasten.



FIGUUR 2.18 MOMENTENLIJN IN Y-RICHTING T.G.V. NORMBELASTING + E.G., IN HET MIDDEN VAN DE PLAAT (LINKS) EN RECHT ONDER DE PUNTLASTEN (RECHTS). MAX. MOMENT MIDDEN = 354,7 KNM/M. MAX. MOMENT ONDER PUNTLAST = 357,9 KNM/M.

Het verschil tussen het maximale moment in het midden van de plaat en onder de puntlasten blijkt erg klein te zijn, namelijk 0,9%. Dit verschil is te verwaarlozen.

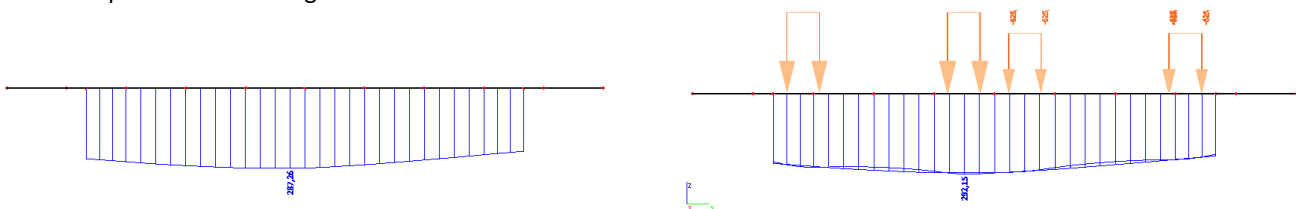
Er is ook gekeken naar het momentenverloop in een plaat met randstroken van 590 mm dik, belast met de normbelasting en het eigen gewicht. Het momentenverloop in zowel doorsnede 1 als onder de puntlasten is in Figuur 2.19 te zien. Het momentenverloop in de randstroken is niet weergegeven; de doorsneden lopen uitsluitend door de plaat.



FIGUUR 2.19 MOMENTENLIJN IN Y-RICHTING T.G.V. NORMBELASTING + E.G., IN HET MIDDEN VAN DE PLAAT (LINKS) EN RECHT ONDER DE PUNTLASTEN (RECHTS). MAX. MOMENT MIDDEN = 286,18 KNM/M. MAX. MOMENT ONDER PUNTLAST = 293,4 KNM/M.

Het verschil tussen het maximale moment in het midden van de plaat en onder de puntlasten is iets groter dan bij de plaat zonder verhoogde randstroken, maar is nog steeds verwaarloosbaar klein: dit verschil bedraagt 2,5%.

Ook is onderzocht in hoeverre een verdeelde belasting over een oppervlakte van 0,4 x 0,4 m, zoals is voorgeschreven in de norm, in plaats van een puntlast, dit verschil nog verder verkleint. In werkelijkheid wordt het brugdek namelijk niet door puntlasten belast, zoals in het model, maar door aslasten die over het contactoppervlakte van de wielen verdeeld worden. De momentenverdeling ten gevolge van de normbelasting met aslasten die verspreid zijn over een contactoppervlakte in plaats van puntlasten is in Figuur 2.20 te zien. Hier is weer sprake van een brugdek met randstroken van 590 mm dik.



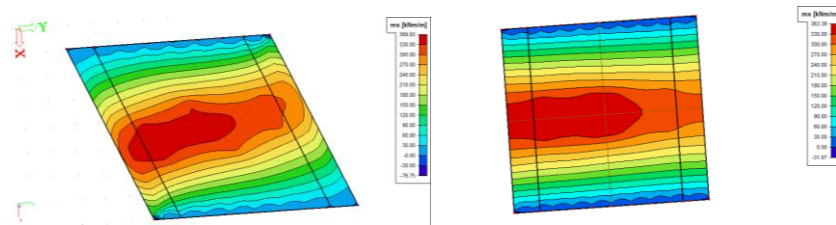
FIGUUR 2.20 MOMENTENLIJN IN Y-RICHTING T.G.V. NORMBELASTING + E.G. MET 'VERDEELDE BELASTING' I.P.V. PUNTLASTEN, IN HET MIDDEN VAN DE PLAAT (LINKS) EN ONDER DE PUNTLASTEN (RECHTS). MAX. M MIDDEN = 287,3 KNM/M. MAX. M ONDER PUNTLAST = 292,2 KNM/M.

Het verschil tussen het maximale moment in het midden van de plaat en onder de puntlasten bedraagt nu 1,7%, dit is nog iets minder dan bij belasting door puntlasten. In werkelijkheid zal het verschil eerder rond deze waarde liggen, het brugdek wordt namelijk nooit belast door een puntlast maar altijd door een last die over een contactoppervlakte verdeeld is.

Voor het maximale moment in de plaat kan er dus naar het moment worden gekeken dat in het midden van de overspanning optreedt, in doorsnede 1, aangezien het verschil tussen het moment in deze doorsnede en onder de puntlasten verwaarloosbaar klein blijkt te zijn.

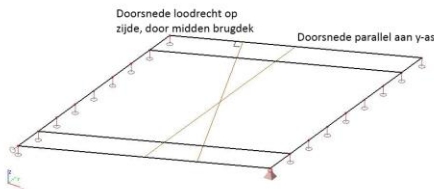
## 2.4.2 MOMENTEN IN HET SCHEEFSTAANDE BRUGDEK

In het scheefstaande brugdek treden de maximale momenten niet meer op in het midden van de overspanning. De momenten in een scheef brugdek trekken naar de stompe hoek toe en in de scherpe hoek wordt het moment lager, waardoor het maximale moment niet in het midden optreedt. In onderstaande afbeelding is dit verschil goed te zien.

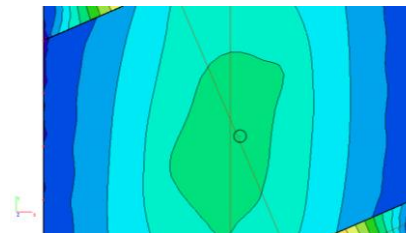


FIGUUR 2.21 MOMENTENVERDELING IN HET SCHEEFSTAANDE (LINKS) EN HET RECHTE (RECHTS) BRUGDEK, ZONDER RANDSTROKEN

De grootte van het maximale moment in de randstroken en in de plaat kan dus voor een scheefstaand brugdek niet meer bepaald worden door naar het momentenverloop in de middendoorsnede te kijken. In Figuur 2.22 zijn twee doorsneden te zien; een doorsnede die door het midden van het brugdek parallel aan de y-as loopt, en een doorsnede die loodrecht op de twee zijdes van de brug staat en door het midden van de brug loopt. Het momentenverloop in beide doorsneden is bekeken, maar geen van beiden toont het maximale moment dat in de plaat en de randstroken optreedt. De maximale momenten ontstaan op een andere locatie in de plaat, die niet bekend is. Het maximale moment in de plaat is bepaald door voor elke knoop in het model in het gebied met de grootste momenten (rond het midden van de plaat) afzonderlijk te kijken hoe groot het moment in die knoop is, en hieruit het maximaal optredende moment te bepalen. Dit maximale moment blijkt telkens iets naast het midden te liggen, zoals in Figuur 2.23 te zien is.



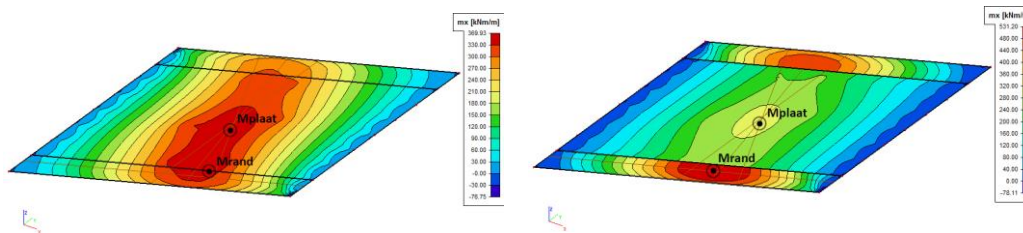
FIGUUR 2.22 DOORSNEDEN IN SCHEEFSTAAND BRUGDEK



FIGUUR 2.23 LOCATIE MAX. MOMENT IN PLAAT (OMCIKELD)

De waarde van het maximale moment in de randstroken wordt automatisch in Scia weergegeven als maximaal optredend moment. Alleen voor een plaat zonder randstroken geldt dit niet; dan is het maximale moment in de plaat namelijk groter dan het maximale moment in de randstroken, waardoor het maximale moment in de randstroken niet wordt weergegeven. Het weergegeven maximale moment is in dat geval  $M_{plaat}$ . De grootte van  $M_{rand}$  is in een plaat zonder randstroken gevonden door naar het momentenverloop op de binnenste rand van de (niet verhoogde) randstrook te kijken; daar is het moment in de randstrook maximaal (zie ook Figuur 2.24).

De precieze locaties van het maximale moment in de randstroken en in de plaat zijn in Figuur 2.24 te zien. Voor een brugdek met verhoogde randstroken ligt  $M_{rand}$  tussen de twee doorsneden uit Figuur 2.22 in. Deze locatie is gevonden door naar waarden van het moment te kijken in afzonderlijke knopen in het model.



FIGUUR 2.24 LOCATIE MAXIMAAL MOMENT IN RANDSTROOK EN PLAAT, BIJ EEN BRUGDEK ZONDER RANDSTROKEN (LINKS) EN MET RANDSTROKEN (RECHTS)

## 3 PARAMETERSTUDIE RECHT BRUGDEK

### 3.1 INLEIDING

Om de invloed van verschillende parameters op de momentenverdeling in een recht brugdek in beeld te brengen, is er een parameterstudie uitgevoerd voor een recht brugdek dat gemodelleerd in Scia. De volgende parameters zijn hierbij gevarieerd:

- Dikte van de randstroken,  $d_{\text{rand}}$
- E-modulus van de randstroken,  $E$
- Breedte van de randstroken,  $b_{\text{rand}}$
- Breedte van de plaat,  $b_{\text{plaat}}$

Hiermee wordt de breedte van het brugdek *tussen* beide randstroken bedoeld.

De parameters zijn eerst apart van elkaar bekeken. Dit betekent dat bij het variëren van een parameter de overige parameters constant zijn gehouden. Vervolgens zijn enkele parameters gecombineerd om het gecombineerde effect van deze parameters op de momentenverdeling in het brugdek te onderzoeken. Deze combinaties zijn gemaakt aan de hand van extreme waarden die zijn opgetreden bij variatie van de parameters afzonderlijk.

Bij het variëren van de parameters is het brugdek telkens belast met de voorgeschreven verkeersbelasting volgens NEN-EN 1991-2, bestaande uit een verdeelde belasting en aslastenstelsels die gemodelleerd zijn als puntlasten. Deze combinatie van verdeelde belasting en aslasten wordt in het vervolg aangeduid met 'normbelasting'. Daarnaast wordt het brugdek ook belast met eigen gewicht.

Om het effect van de variatie van de verschillende parameters op de momentenverdeling in de plaat in beeld te brengen, is telkens het maximale moment in de plaat,  $M_{\text{plaat}}$ , vergeleken met het maximale moment in de randstroken,  $M_{\text{rand}}$ , en zijn deze waarden vergeleken met referentiewaarden. Bij het bepalen van deze waarden is telkens gekeken naar momenten in doorsnede 1; een doorsnede door het midden van de plaat in y-richting (zie ook Figuur 2.16). Hoe deze momenten zijn bepaald en waar in de doorsnede deze maximale momenten precies optreden, is beschreven in paragraaf 2.4.1 en Figuur 2.17.

### 3.2 VARIATIE DIKTE RANDSTROKEN

Bij het variëren van de dikte van de randstroken zijn vijf waarden voor  $d_{\text{rand}}$  gemodelleerd en geanalyseerd, met behulp van vijf verschillende modellen (M1d-M5d). In het model dat als referentie wordt gebruikt, model M1d, bedraagt de dikte van de randstroken 450 mm: hiermee zijn de randstroken even dik als de plaat, en is er dus geen sprake van verhoogde randstroken. De grootte van de resulterende momenten in dit model zijn als referentiewaarden gebruikt. Vervolgens is de dikte in stappen vergroot tot een dikte van 900 mm, oftewel tweemaal de dikte van de plaat.

De overige parameters zijn constant gehouden, en hebben de volgende waarden:

$b_{\text{rand}} = 1 \text{ m}$

$b_{\text{plaat}} = 5,5 \text{ m}$

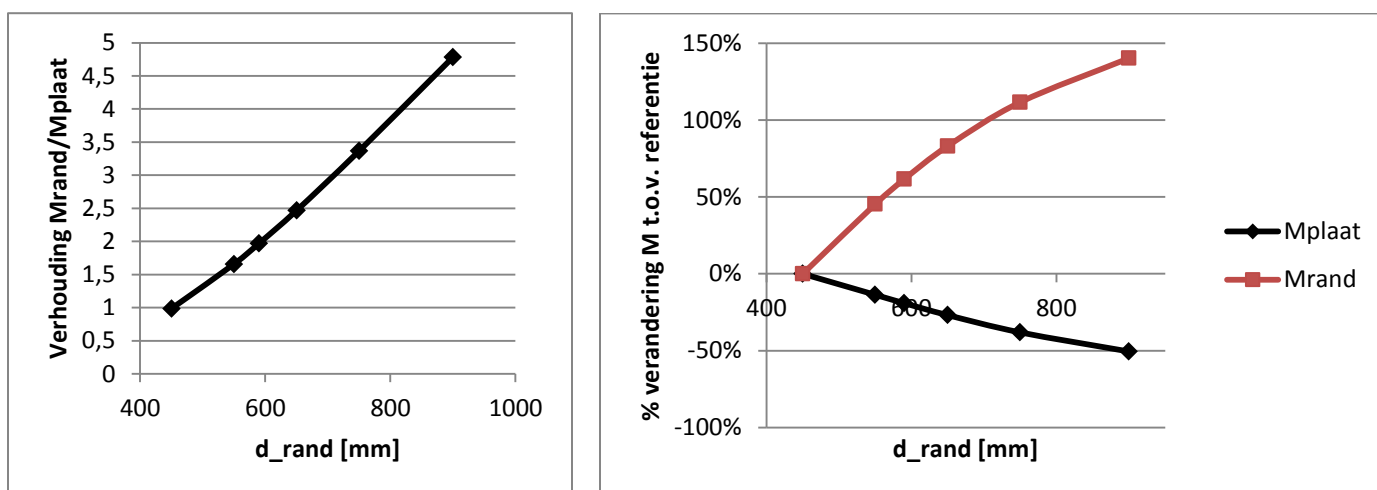
$E = 39 \text{ GPa}$

#### 3.2.1 RESULTATEN

In Tabel 3.1 zijn de resultaten van het variëren van de dikte van de randstroken per model weergegeven. Voor elk moment is de momentenlijn in doorsnede 1 te vinden in Bijlage C, C.1. Voor elk model is berekend hoeveel groter het maximale moment in de randstrook is ten opzichte van het maximale moment in de plaat, door middel van de verhouding  $M_{\text{rand}}/M_{\text{plaat}}$ . Ook is weergegeven hoeveel groter of kleiner de momenten in elk model zijn ten opzichte van de situatie zonder randstroken. Deze waarden zijn ook grafisch weergegeven in Figuur 3.1.

TABEL 3.1: RESULTATEN VARIATIE D\_RAND, BIJ BELASTING MET NORMBELASTING + E.G.

| d_rand [mm]                                  | 450    | 550    | 590 <sup>1</sup> | 650    | 750    | 900    |
|----------------------------------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|--------|
| Model                                        | M1d    | M2d    | M3d              | M4d    | M5d    | M6d    |
| geen randstroken<br>(referentie)             |        |        |                  |        |        |        |
| % verandering d_rand                         |        | 22,2%  | 31,1%            | 44,4%  | 66,7%  | 100%   |
| Mplaat [kNm/m]                               | 354,72 | 306,28 | 286,99           | 259,44 | 219,66 | 175,59 |
| Mrand [kNm/m]                                | 349,52 | 507,75 | 564,52           | 639,91 | 739,43 | 839,48 |
| Verhouding Mrand/Mplaat                      | 0,99   | 1,66   | 1,97             | 2,47   | 3,37   | 4,78   |
| % verandering Mplaat t.o.v. referentiewaarde |        | -13,7% | -19,1%           | -26,9% | -38,1% | -50,5% |
| % verandering Mrand t.o.v. referentiewaarde  |        | 45,3%  | 61,5%            | 83,1%  | 111,6% | 140,2% |



FIGUUR 3.1 VERHOUDING MRAND/MPLAAT EN HET PERCENTAGE VERANDERING T.O.V. DE REFERENTIEWAARDEN UITGEZET TEGEN D\_RAND

Het is duidelijk dat de randstroken steeds meer belasting naar zich toe trekken naarmate  $d_{rand}$  toeneemt; het moment in de randstroken wordt steeds groter terwijl het moment in de plaat afneemt. De verhouding tussen de momenten lijkt lineair toe te nemen. Wat opvalt, is dat het groter worden van het moment in de randstrook bijna driemaal zo snel gaat als het afnemen van het moment in de plaat. Dit is te verklaren door het feit dat de plaat veel breder is dan de randstroken.

Vergeleken met de procentuele verandering van de dikte is de procentuele toename van Mrand erg groot: bij een eerste toename van de dikte van 22%, neemt Mrand al met meer dan het dubbele, 45%, toe ten opzichte van de referentiewaarde. In de werkelijke situatie ( $d_{rand} = 590$  mm) is het maximale moment in de randstrook maar liefst 62% groter dan in een vlakke plaat zonder randstroken.

### 3.2.2 EFFECTEN VAN KLEINE VARIATIES IN DE DIKTE VAN DE RANDSTROKEN

De verschillende waarden voor de dikte van de randstroken waartussen is gevarieerd, zijn relatief grote waarden die niet zo snel zullen voorkomen bij de Halvemaansbrug. Om ook het effect in beeld te brengen van kleinere variaties die bijvoorbeeld kunnen ontstaan door onzorgvuldigheden bij de bouw, is  $d_{rand}$  nogmaals gevarieerd. Ditmaal is de werkelijke dikte van de randstroken (590 mm) als referentiesituatie gekozen, en is de dikte van de rand met slechts 10 mm vergroot en verkleind.

Er is gekeken naar de momenten die ontstaan ten gevolge van de normbelasting en het eigen gewicht, en de momenten die ontstaan ten gevolge van uitsluitend het eigen gewicht. In Tabel 3.2 zijn de resultaten te zien met

<sup>1</sup> Werkelijke dikte van de randstroken van de Halvemaansbrug

de normbelasting en het eigen gewicht als belasting, in Tabel 3.3 zijn de resultaten te zien met uitsluitend het eigen gewicht als belasting.

TABEL 3.2 RESULTATEN KLEINE VARIATIE D\_RAND, MOMENTEN TEN GEVOLGE VAN NORMBELASTING + E.G.; VERSCHILLEN T.O.V. BRUGDEK MET D\_RAND = 590 MM

| <b>d_rand [mm]</b>                           | <b>580</b>          | <b>590</b> | <b>600</b> |
|----------------------------------------------|---------------------|------------|------------|
| Model                                        | M7d                 | M3d        | M8d        |
| <b>M t.g.v. normbelasting + E.G.</b>         | <b>(referentie)</b> |            |            |
| % verandering d_rand                         | -1,7%               |            | 1,7%       |
| Mplaat [kNm/m]                               | 291,76              | 286,99     | 282,26     |
| Mrand [kNm/m]                                | 550,79              | 564,52     | 577,92     |
| Verhouding Mrand/Mplaat                      | 1,89                | 1,97       | 2,05       |
| % verandering Mplaat t.o.v. referentiewaarde | 1,7%                |            | -1,6%      |
| % verandering Mrand t.o.v. referentiewaarde  | -2,4%               |            | 2,4%       |

TABEL 3.3 RESULTATEN KLEINE VARIATIE D\_RAND, MOMENTEN TEN GEVOLGE VAN EIGEN GEWICHT; VERSCHILLEN T.O.V. BRUGDEK MET D\_RAND = 590 MM

| <b>d_rand [mm]</b>                           | <b>580</b>          | <b>590</b> | <b>600</b> |
|----------------------------------------------|---------------------|------------|------------|
| Model                                        | M7d                 | M3d        | M8d        |
| <b>M t.g.v. eigen gewicht (E.G.)</b>         | <b>(referentie)</b> |            |            |
| % verandering dikte                          | -1,7%               |            | 1,7%       |
| Mplaat [kNm/m]                               | 56,91               | 56,01      | 55,12      |
| Mrand [kNm/m]                                | 116,85              | 120,19     | 123,49     |
| Verhouding Mrand/Mplaat                      | 2,05                | 2,15       | 2,24       |
| % verandering Mplaat t.o.v. referentiewaarde | 1,6%                |            | -1,6%      |
| % verandering Mrand t.o.v. referentiewaarde  | -2,8%               |            | 2,8%       |

Vergeleken met de procentuele verandering van de dikte is de procentuele toe- en afname van Mrand en Mplaat vrij groot: Mplaat verandert ongeveer evenveel als d\_rand, Mrand verandert 1,4 keer zoveel als d\_rand. Bij belasting met uitsluitend eigen gewicht, verandert Mplaat zelfs 1,6 keer zoveel als d\_rand.

Als er echter wordt gekeken naar de invloed van een foute aanname van de dikte, of een constructiefout van 10 mm, is een afwijking van 2,5% als gevolg van een dergelijke fout niet bijzonder groot. In de belastingsfactor voor het eigen gewicht zit al een marge van 10-15%, vergeleken met die marge is een fout van 2,5% niet erg significant. Daarnaast is het verschil tussen belasting met de normbelasting en belasting met uitsluitend het eigen gewicht met een verschil van 0,4% te verwaarlozen.

In paragraaf 4.4 zal verder worden ingegaan op de effecten van kleine variaties van d\_rand voor een recht en een scheefstaand brugdek, belast door verschillende belastingsgevallen.

### 3.3 VARIATIE E-MODULUS RANDSTROKEN

Voor het variëren van de E-modulus is model M1d gebruikt, het model zonder verhoogde randstroken. In dit model is de E-modulus van de randstroken telkens veranderd, zodat de stijfheid van de randstroken varieert terwijl de dikte constant blijft.

Eerst is er gevarieerd tussen een aantal realistische waarden voor de E-modulus, behorend bij bepaalde betonsoorten. Vervolgens is de E-modulus van de randstroken telkens veranderd zodat de stijfheid (EI) van de randstroken overeenkomt met de stijfheid van de randstroken uit modellen M2d-M6d, de modellen met verhoogde randstroken. Hiermee is onderzocht of het veranderen van de E-modulus hetzelfde effect heeft als het verhogen van de randstroken op de momentenverdeling.

Bij het variëren van de E-modulus zijn de overige parameters constant gehouden:

$b_{\text{rand}} = 1 \text{ m}$

$b_{\text{plaat}} = 5,5 \text{ m}$

$d_{\text{rand}} = 450 \text{ mm}$

#### 3.3.1 RESULTATEN VARIATIE TUSSEN E-MODULI VAN BETONSOORTEN

Eerst is er gevarieerd tussen een aantal verschillende, realistische waarden voor de E-modulus. Dit zijn E-moduli die bij bepaalde betonsoorten horen<sup>1</sup>. Resultaten van deze variatie zijn te zien in onderstaande tabel.

TABEL 3.4 RESULTATEN VARIATIE REALISTISCHE E-MODULI; BEHOREND BIJ BEPAALDE BETONSOORTEN

| E-modulus [GPa]                                | 39         | 40,7   | 42,2   | 43,6    |
|------------------------------------------------|------------|--------|--------|---------|
|                                                | Referentie |        |        |         |
| Betonsoort                                     | C60/75     | C70/85 | C80/95 | C90/105 |
| % verandering t.o.v. referentie                |            | 4,4%   | 8,2%   | 11,8%   |
| Mplaat-E [kNm/m]                               | 354,72     | 351,78 | 349,08 | 346,61  |
| Mrand-E [kNm/m]                                | 349,52     | 359,15 | 367,97 | 376,03  |
| Verhouding Mrand-E /Mplaat-E                   | 0,99       | 1,02   | 1,05   | 1,08    |
| % verandering Mplaat-E t.o.v. referentiewaarde |            | -0,83% | -1,6%  | -2,3%   |
| % verandering Mrand-E t.o.v. referentiewaarde  |            | 2,8%   | 5,3%   | 7,6%    |

Uit deze resultaten blijkt dat de momenten in de plaat afnemen en de momenten in de randstroken toenemen bij het vergroten van de E-modulus, en daarmee ook de stijfheid. Vergeleken met de procentuele verandering van de E-modulus, is de procentuele toe- en afname van Mrand-E en Mplaat-E niet bijzonder groot: bij een bepaalde procentuele verandering van E, veranderen momenten met maximaal  $\frac{1}{3}$  van deze procentuele verandering.

#### 3.3.2 VERGELIJKING MET VARIATIE DIKTE RANDSTROKEN

Door een bepaalde waarde voor E te kiezen, kan eenzelfde waarde voor EI worden bereikt als in modellen M2d-M6d: In plaats van bij een constante E-modulus te variëren in de dikte, wat leidt tot een hoger traagheidsmoment I, is nu gevarieerd in de E-modulus, en wordt I constant gehouden door een constante dikte en breedte. De berekening van de E-moduli die leiden tot dezelfde waarden voor EI als de verschillende diktes, is te vinden in Bijlage C.2, Tabel C.2.

<sup>1</sup> De waarde van de E-modulus die bij een bepaalde betonsoort hoort, is in Scia bepaald volgens EN1992-2.



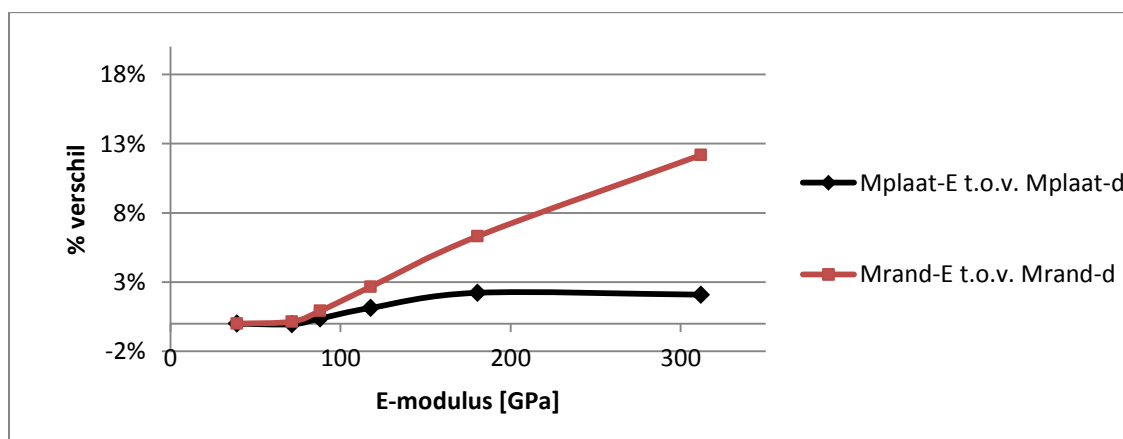
De E-moduli die leiden tot eenzelfde stijfheid als randstroken met een bepaalde dikte blijken erg groot te zijn, de grootste E-modulus is 312 GPa. Deze waarden zijn niet realistisch voor betonnen randstroken; de E-modulus van C90/105, de sterkste soort beton die over het algemeen wordt gebruikt, bedraagt namelijk 44 GPa<sup>1</sup>. De grote waarden zijn echter wel gebruikt in de modellen, zodat de resultaten kunnen worden vergeleken met de resultaten van het variëren van d\_rand.

De resultaten van de variatie van de E-modulus zijn vergeleken met de resultaten van de variatie van d\_rand, om te zien of het variëren in stijfheid op twee verschillende manieren eenzelfde momentenverdeling tot gevolg heeft. In Tabel 3.5 zijn de resultaten van het variëren van de E-modulus weergegeven. De momenten die optreden bij variatie van de E-modulus worden Mplaat-E en Mrand-E genoemd, de momenten die optreden bij variatie van d\_rand worden Mplaat-d en Mrand-d genoemd.

TABEL 3.5 RESULTATEN VARIATIE E-MODULUS RANDSTROKEN, BIJ BELASTING MET NORMBELASTING + E.G.; VERGELIJKING MET VARIATIE D RAND

| E [GPa]                                    | 39                  | 71,4          | 88,1         | 117,8       | 180,6       | 312,0        |
|--------------------------------------------|---------------------|---------------|--------------|-------------|-------------|--------------|
| Model                                      | M1b<br>(referentie) | M2E           | M3E          | M4E         | M5E         | M6E          |
| Komt overeen met dikte [mm]:               | 450                 | 550           | 590          | 650         | 750         | 900          |
| % toename E t.o.v. referentie              |                     | + 83%         | +126%        | +202%       | +363%       | +700%        |
| Mplaat-d [kNm/m]                           | 354,72              | 306,28        | 286,99       | 259,44      | 219,66      | 175,59       |
| <b>Mplaat-E [kNm/m]</b>                    | 354,72              | 306,15        | 288,07       | 262,4       | 224,56      | 179,27       |
| <b>% verschil Mplaat-E t.o.v. Mplaat-d</b> |                     | <b>-0,04%</b> | <b>0,38%</b> | <b>1,1%</b> | <b>2,2%</b> | <b>2,1%</b>  |
| Mrand-d [kNm/m]                            | 349,52              | 507,75        | 564,52       | 639,91      | 739,43      | 839,48       |
| <b>Mrand-E [kNm/m]</b>                     | 349,52              | 508,49        | 569,73       | 656,98      | 786,08      | 941,72       |
| <b>% verschil Mrand-E t.o.v. Mrand-d</b>   |                     | <b>0,15%</b>  | <b>0,92%</b> | <b>2,7%</b> | <b>6,3%</b> | <b>12,2%</b> |

In onderstaande grafiek is weergegeven met hoeveel procent de resulterende momenten bij het variëren van de E-modulus (Mplaat-E, Mrand-E) afwijken van de resulterende momenten bij het variëren van de randdikte (Mplaat-d, Mrand-d).



FIGUUR 3.2: RELATIEVE VERSCHIL TUSSEN MOMENTEN BIJ HET VARIËREN VAN DE E-MODULUS EN D RAND

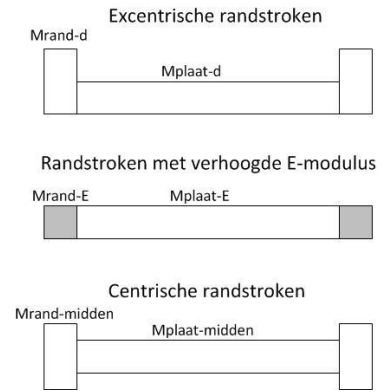
Naarmate de E-modulus en daarmee de stijfheid groter wordt, wijken de momenten steeds meer af van de momenten die ontstaan bij het variëren van de dikte; het moment in de randstroken wijkt een stuk sterker af dan het moment in de plaat. De maximale afwijking van het moment bedraagt 12,2%, bij een E-modulus van 312 GPa.

<sup>1</sup> van Walraven, J. C., Fennis, S.A.A.M. (2013). *Dictaat CT2052/3150 Gewapend Beton*. Delft: TU Delft.

### 3.3.3 MOGELIJKE OORZAKEN VAN DE AFWIJINGEN

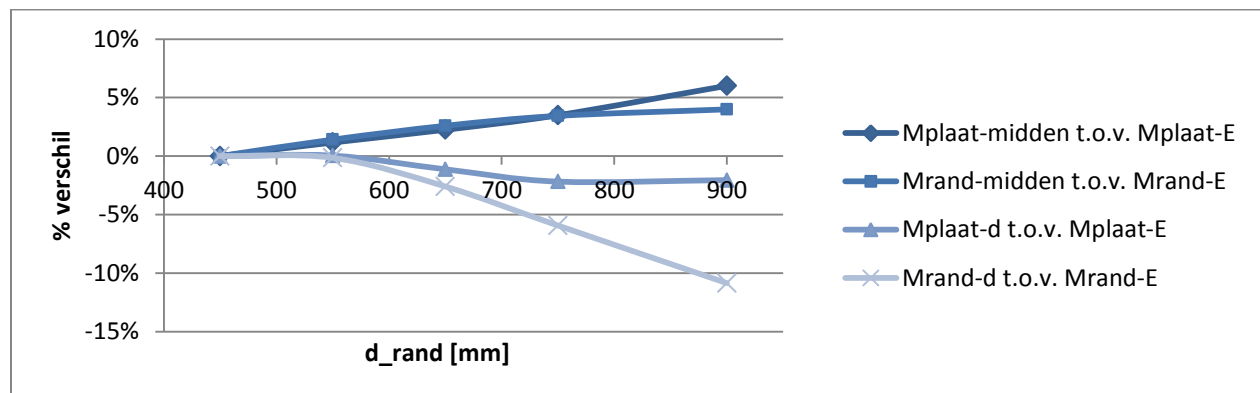
#### MANIER VAN VERHOGEN RANDSTROKEN

Een oorzaak van het verschil in momenten tussen het veranderen van de E-modulus en het verhogen van de randstroken zou kunnen zijn dat de randstroken bij variatie van  $d_{\text{rand}}$  alleen aan de bovenkant van de plaat worden verhoogd (excentrisch, zie ook paragraaf 2.1) terwijl de E-modulus overall in de doorsnede evenveel wordt vergroot. Om te zien in hoeverre dit aspect verantwoordelijk is voor de afwijkingen, is er een vergelijking gemaakt tussen de momenten die optreden wanneer de randstroken alleen aan de bovenkant zijn verhoogd (excentrische randstroken) en de momenten die optreden in een model waarbij randstroken zowel aan de boven- als onderkant zijn verhoogd, zogenaamde gecentreerde randstroken. Zie ook Figuur 3.3. Beide modellen worden vergeleken ten opzichte van de grootte van de momenten die optreden bij variatie van de E-modulus.



FIGUUR 3.3 VERSCHILLENDE VERSTERKTE RANDSTROKEN

Deze vergelijking is grafisch weergegeven in Figuur 3.4. Het relatieve verschil tussen de momenten in excentrische randstroken (Mplaat-d, Mrand-d) en randstroken met een verhoogde E-modulus (Mplaat-E, Mrand-E), is weergegeven, evenals het relatieve verschil tussen de momenten in gecentreerde randstroken (Mplaat-midden, Mrand-midden) en randstroken met een verhoogde E-modulus (Mplaat-E, Mrand-E). De relatieve verschillen zijn bepaald ten opzichte van Mplaat-E en Mrand-E. Een tabel met de exacte waarden van alle momenten is te vinden in Bijlage C.2, Tabel C.4.



FIGUUR 3.4 RELATIEVE VERSCHIL TUSSEN MOMENTEN BIJ VERHOOGDE RANDBALKEN EN BIJ RANDBALKEN MET VERHOOGDE E-MODULUS

De momenten die ontstaan bij gecentreerde randbalken, Mrand-midden en Mplaat-midden, zijn allemaal iets groter dan de momenten die ontstaan bij het vergroten van de E-modulus. De momenten in het model met excentrische randstroken, Mrand en Mplaat, zijn allemaal kleiner dan de momenten die ontstaan bij het vergroten van de E-modulus. Daarnaast verschilt Mrand relatief meer dan Mrand-midden van Mrand-E, maar verschilt Mplaat juist minder dan Mplaat-midden van Mplaat-E. Een model waarin de randbalken gecentreerd zijn, komt dus niet veel sterker overeen met het model waarin de stijfheid wordt bepaald door de E-modulus dan het oorspronkelijke model.

#### GROOTTE VAN DE E-MODULI

Een andere verklaring voor de afwijkingen die in Figuur 3.2 te zien zijn, zou kunnen zijn dat de E-moduli die zijn gebruikt geen realistische grootte hebben voor betonnen randstroken: in werkelijkheid bestaat er geen beton met zulke hoge E-moduli. Het verschil tussen de momenten neemt namelijk toe naarmate de E-modulus groter, en daarmee minder realistisch, wordt. Om te onderzoeken of de niet-realistische grootte van de E-moduli de oorzaak is van de afwijking, is gekeken naar de variatie tussen kleinere, realistische E-moduli uit Tabel 3.4. Deze resultaten

(Mplaat-E, Mrand-E) zijn vergeleken met de momenten die optreden bij randstroken met diktes die in verhouding zijn met de kleinere E-moduli (Mplaat-d, Mrand-d), zie Tabel 3.6. Een tabel met de resultaten waarop deze percentages gebaseerd zijn, is te vinden in Bijlage C.2, Tabel C.5.

TABEL 3.6 PROCENTUELE VERSCHILLEN TUSSEN MOMENTEN BIJ VARIATIE D RAND EN VARIATIE E

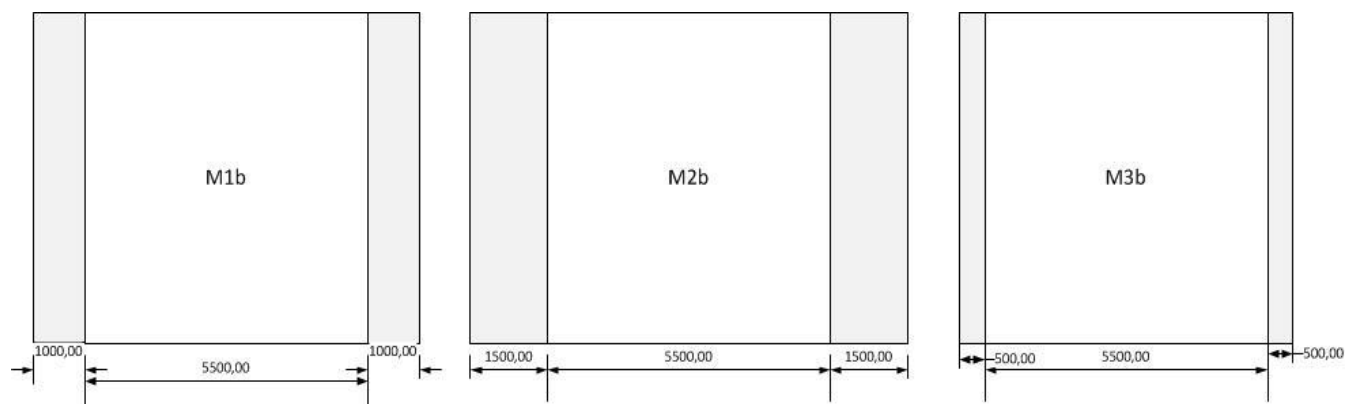
| E-modulus [GPa]                     | 39  | 40,7  | 42,2  | 43,6  | 71,4  | 88,1  | 117,8 |
|-------------------------------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Komt overeen met d_rand [mm]        | 450 | 456,1 | 461,6 | 466,6 | 550   | 590   | 650   |
| % verschil Mplaat-E t.o.v. Mplaat-d |     | 0,06% | 0,12% | 0,17% | 0,04% | 0,38% | 1,14% |
| % verschil Mrand-E t.o.v. Mrand-d   |     | 0,10% | 0,15% | 0,18% | 0,15% | 0,92% | 2,67% |

In bovenstaande tabel is te zien dat het verschil tussen de momenten bij variatie van d\_rand (Mplaat-d, Mrand-d) en de momenten bij variatie van de E-modulus (Mplaat-E, Mrand-E) relatief klein zijn bij kleine veranderingen van d\_rand en de E-modulus: de verschillen worden niet groter dan 0,2%. Pas vanaf d\_rand = 590 mm wordt het verschil duidelijk groter; het verschil bedraagt dan bijna 1% voor het moment in de randstroken. Bij een dikte van 650 mm is het verschil zelfs 2,7% voor het moment in de randstroken.

Tot een dikte van 590 mm heeft het vergroten van de dikte van de randstroken dus ongeveer hetzelfde effect als het verhogen van de E-modulus van die randstroken, het verschil tussen de resulterende momenten bedraagt dan minder dan 1%. Vanaf een dikte van de randstroken van 650 mm wordt het verschil een stuk groter, en komen de resulterende momenten niet meer goed overeen. Dit geldt voor het huidige model; een recht brugdek met een overspanning van 7,06 m, b\_rand = 1 m en b\_plaat = 5,5 m.

### 3.4 VARIATIE BREEDTE RANDSTROKEN

Voor het variëren van de breedte van de randstroken zijn drie verschillende modellen gebruikt; M1b, M2b en M3b. M1b wordt als referentie gebruikt, in dit model zijn de randstroken 1 meter breed zoals in werkelijkheid. M2b en M3b zijn modellen met randstroken van een halve meter breder en een halve meter smaller dan de werkelijke breedte. In alle modellen zijn de randstroken 590 mm dik, ook zoals in werkelijkheid. In onderstaande figuur zijn de drie modellen met hun afmetingen weergegeven.



FIGUUR 3.5 AFMETINGEN VAN MODEL M1B, M2B EN M3B [MM]

De volgende parameters worden constant gehouden:

d\_rand = 590 mm

b\_plaat = 5,5 m

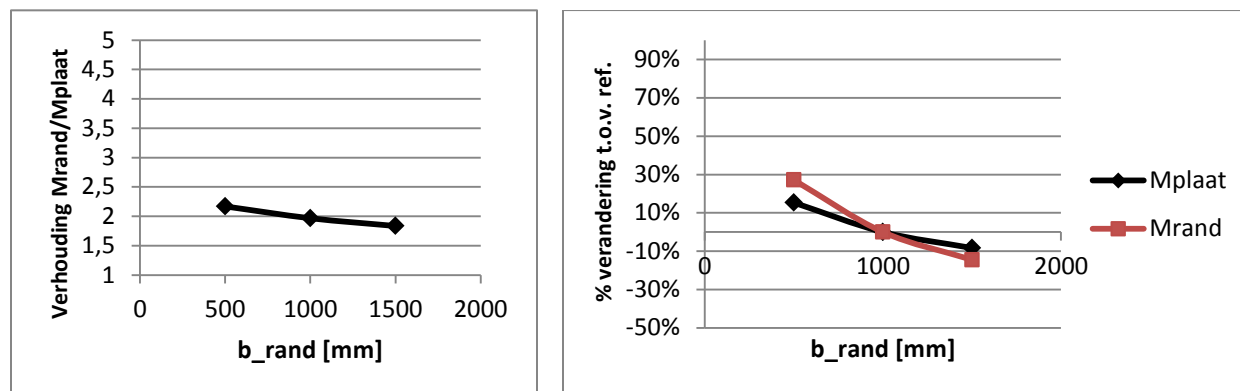
E = 39 GPa

### 3.4.1 RESULTATEN

In Tabel 3.7 zijn de resultaten van het variëren van de breedte van de randstrook per model weergegeven. Net als bij de resultaten van het variëren van de dikte van de randstroken, is hier ook voor elk model de verhouding  $M_{rand}/M_{plaat}$  berekend. Ook is weergegeven hoeveel groter of kleiner de momenten in elk model zijn ten opzichte van het referentiemodel, waarin de randstroken 1 m breed zijn net als in werkelijkheid. Als laatste is in de tabel het totale moment in de randstrook weergegeven in kNm ( $M_{rand} * b_{rand}$ ), in plaats van het moment per eenheid van breedte. In Figuur 3.6 zijn deze waarden grafisch weergegeven. Voor elk moment is de momentenlijn in doorsnede 1 te vinden in Bijlage C, C.3

TABEL 3.7 RESULTATEN VARIATIE  $b_{rand}$ , BIJ BELASTING MET NORMBELASTING + E.G.

| $b_{rand}$ [m]                                    | 1,0          | 1,5    | 0,5    |
|---------------------------------------------------|--------------|--------|--------|
| Model                                             | M1b          | M2b    | M3b    |
|                                                   | (referentie) |        |        |
| % verandering $b_{rand}$                          |              | 50%    | -50%   |
| $M_{plaat}$ [kNm/m]                               | 286,99       | 263,07 | 331,02 |
| $M_{rand}$ [kNm/m]                                | 564,52       | 482,71 | 717,77 |
| Verhouding $M_{rand}/M_{plaat}$                   | 1,97         | 1,83   | 2,17   |
| % verandering $M_{plaat}$ t.o.v. referentiewaarde |              | -8,3%  | 15,3%  |
| % verandering $M_{rand}$ t.o.v. referentiewaarde  |              | -14,5% | 27,2%  |
| Totale moment in randstrook [kNm]                 | 564,5        | 724,1  | 358,9  |
| % verschil totale moment randstrook t.o.v. ref.   |              | 28,3%  | -36,4% |



FIGUUR 3.6 VERHOUDING  $M_{rand}/M_{plaat}$  EN HET PERCENTAGE VERANDERING T.O.V. DE REFERENTIEWAARDEN UITGEZET TEGEN  $b_{rand}$

Naarmate de randstroken breder worden, blijkt dat zowel het maximale moment in de rand als in de plaat afneemt. In de randstroken worden de momenten blijkbaar verdeeld over het grotere oppervlakte; aangezien de momenten gegeven zijn per eenheid van breedte (kNm/m) nemen deze momenten af. Als het totale moment in de randstrook in kNm bekeken wordt, komt hier bij een grotere breedte wel een grotere waarde uit dan in de referentiesituatie. De randstroken trekken dus in totaal meer belasting naar zich toe naarmate deze breder worden. Bij het versmallen van de randstroken neemt het moment per eenheid van breedte toe, aangezien de momenten nu over een kleinere oppervlakte verdeeld worden. In totaal neemt het moment in de randstrook echter af, wat betekent dat smallere randstroken minder belasting naar zich toe trekken en het moment in de plaat groter wordt.

Vergeleken met de procentuele verandering van de breedte is de procentuele toe- en afname van  $M_{rand}$  en  $M_{plaat}$  niet bijzonder groot: bij een toe- of afname van de breedte van 50% verschilt het moment per eenheid van breedte met maximaal 27% van de referentiewaarde, en het totale moment in de randstrook met 36%. Dit is veel minder dan bij variatie van de dikte van de randstroken.

### 3.4.2 VERGELIJKING MET VARIATIE E-MODULUS

Aangezien de breedte van een doorsnede ook invloed heeft op de grootte van het traagheidsmoment en de EI-waarde, is het variëren van  $b_{\text{rand}}$ , net als  $d_{\text{rand}}$ , vergeleken met het variëren van de E-modulus. Hiervoor is berekend welke waarde voor E tot eenzelfde EI leidt als de verschillende breedtes. Deze berekening is te vinden in Bijlage C.2, Tabel C.3.

Met behulp van model M1b zijn de waarden voor  $M_{\text{plaat}}$  en  $M_{\text{rand}}$  berekend die ontstaan bij randstroken met verschillende E-moduli. Hierbij zijn de waarden voor  $d_{\text{rand}}$ ,  $b_{\text{rand}}$  en  $b_{\text{plaat}}$  constant gehouden. Een vergelijking tussen deze waarden en de waarden bij variatie van  $b_{\text{rand}}$  is weergegeven in Tabel 3.8. Uitgebreide resultaten zijn te vinden in Bijlage C.2, Tabel C.6.

TABEL 3.8 % VERSCHIL IN GROOTTE VAN MOMENTEN BIJ VARIATIE VAN E T.O.V. DE GROOTTE VAN MOMENTEN BIJ VARIATIE VAN  $b_{\text{rand}}$

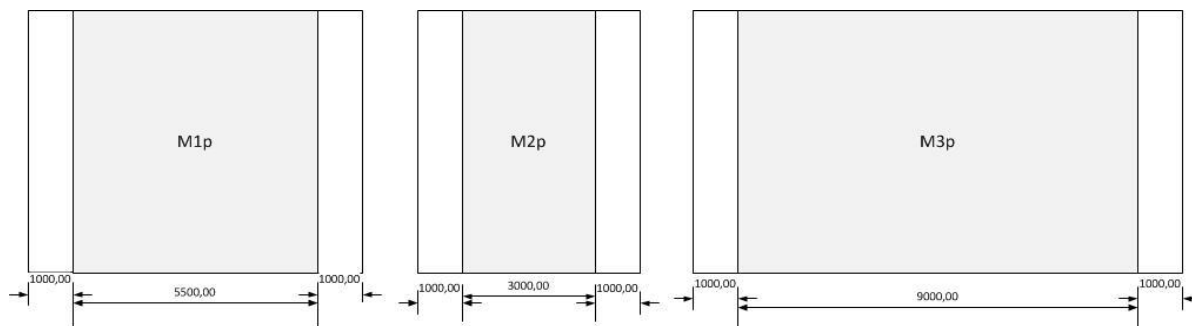
| E [GPa]                                                         | 58,5  | 19,5   |
|-----------------------------------------------------------------|-------|--------|
| Komt overeen met breedte [m]:                                   | 1,5   | 0,5    |
| % verschil $M_{\text{plaat-E t.o.v. } M_{\text{plaat}}}$        | -4,2% | 4,2%   |
| % verschil $M_{\text{rand-E t.o.v. } M_{\text{rand}}}$          | 41,8% | -47,6% |
| % verschil $M_{\text{rand-E t.o.v. } M_{\text{rand, in [kNm]}}$ | -5,5% | 4,7%   |

Het verschil tussen het moment in de randstrook bij een variabele breedte ( $M_{\text{rand}}$ ) en een variabele E-modulus ( $M_{\text{rand-E}}$ ) blijkt erg groot te zijn, zoals in bovenstaande tabel te zien is. Dit wordt veroorzaakt doordat de momenten gegeven zijn per eenheid van breedte (kNm/m), terwijl de breedte van de randstroken waarin deze verschillende momenten optreden niet gelijk zijn. Wanneer deze momenten in kNm worden uitgedrukt (vermenigvuldigd met de breedte van de randstrook), komen deze momenten beter met elkaar overeen; in dat geval is het verschil ongeveer 5%.

### 3.5 VARIATIE BREEDTE PLAAT

Bij het variëren van  $b_{\text{plaat}}$  is gekeken naar de breedte van de plaat tussen de twee randstroken, de breedte van de randstroken blijft dus constant. Om de modellen realistisch te houden, is gevarieerd in het aantal rijstroken dat mogelijk is op de plaat. Het versmallen van de plaat met 1 m zou bijvoorbeeld niet realistisch zijn, aangezien er dan niet meer twee rijstroken op het wegdek zouden passen, maar er wel meer ruimte dan nodig zou zijn voor maar één rijstrook.

Voor het variëren van de breedte van de plaat zijn drie verschillende modellen gebruikt; M1p, M2p en M3p. M1p wordt als referentie gebruikt, in dit model is de plaat 5,5 m breed zoals in werkelijkheid. M2p is een model met maar één rijstrook in plaats van twee, de breedte van de plaat bedraagt hier 3 m. In model M3p zijn drie rijstroken gemodelleerd, met een totale breedte van 9 m<sup>1</sup>. In alle modellen zijn de randstroken 590 mm dik, zoals in werkelijkheid. In Figuur 3.7 zijn de drie modellen met hun afmetingen weergegeven.



FIGUUR 3.7 AFMETINGEN VAN MODEL M1P, M2P EN M3P [MM]

<sup>1</sup> De benodigde breedte per rijstrook is bepaald volgens NEN-EN 1991-2+C1:2011. (2011). Eurocode 1: Belastingen op constructies – Deel 2: Verkeersbelasting op bruggen NEN.

Aangezien er rijstroken worden toegevoegd en weggehaald, moet de normbelasting hierop aangepast worden. In model M2p is daarom maar één set aslasten gebruikt met bijbehorende verdeelde belasting, in model M3p zijn de aslasten op elk van de drie rijstroken geplaatst met bijbehorende verdeelde belasting. De precieze belasting die op elk model is geplaatst met bijbehorende waarden en posities is te vinden in Figuur B.1 in Bijlage B.2.

De volgende parameters zijn constant gehouden:

$d_{\text{rand}} = 590 \text{ mm}$

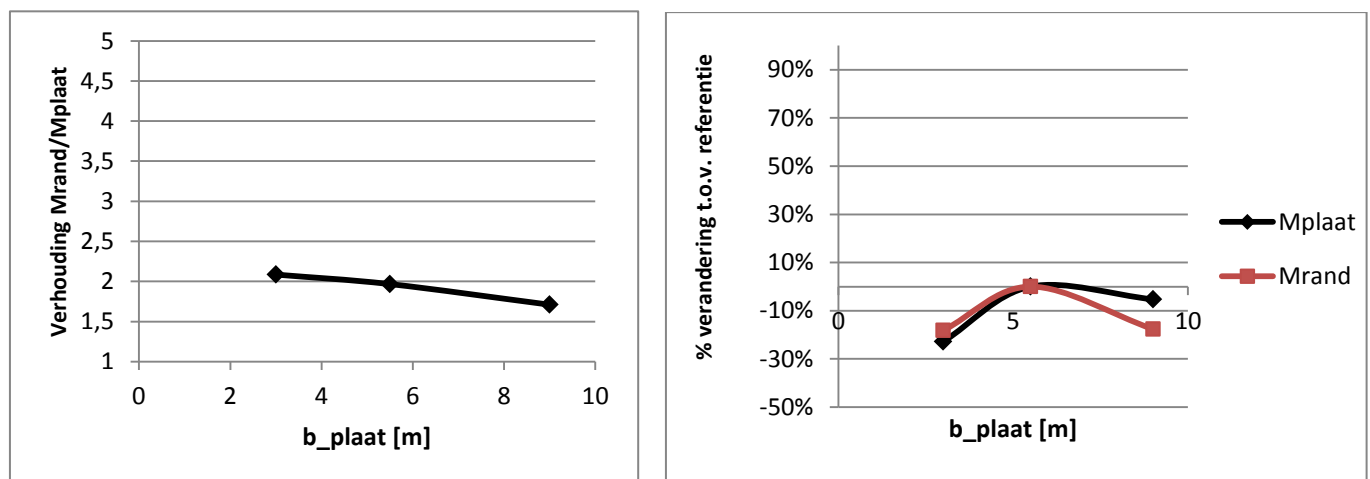
$b_{\text{rand}} = 1 \text{ m}$

$E = 39 \text{ GPa}$

In onderstaande tabel zijn de resultaten van het variëren van de breedte van de plaat per model weergegeven, op dezelfde manier als bij het variëren van  $b_{\text{rand}}$ . In Figuur 3.8 zijn deze waarden grafisch weergegeven. Voor elk moment is de momentenlijn in doorsnede 1 te vinden in Bijlage C, C.4.

TABEL 3.9 RESULTATEN VARIATIE  $b_{\text{PLAAT}}$

| $b_{\text{plaat}} [\text{m}]$    | 5,5              | 3 (1 rijstrook) | 9 (3 rijstroken) |
|----------------------------------|------------------|-----------------|------------------|
| Model                            | M1p (referentie) | M2p             | M3p              |
| % verandering $b_{\text{plaat}}$ |                  | -45,5%          | 63,6%            |
| Mplaat [kNm/m]                   | 286,99           | 221,46          | 271,85           |
| Mrand [kNm/m]                    | 564,52           | 461,94          | 464,92           |
| Verhouding Mrand/Mplaat          | 1,97             | 2,09            | 1,71             |
| % verandering Mplaat t.o.v. ref. |                  | -22,8%          | -5,3%            |
| % verandering Mrand t.o.v. ref.  |                  | -18,2%          | -17,6%           |



FIGUUR 3.8 VERHOUDING MRAND/MPLAAT EN HET PERCENTAGE VERANDERING T.O.V. DE REFERENTIEWAARDEN UITGEZET TEGEN  $b_{\text{PLAAT}}$

Naarmate de plaat breder wordt, blijkt het moment in de randstrook ten opzichte van het moment in de plaat iets af te nemen; de verhouding Mrand/Mplaat neemt af. Bij het breder worden van de plaat trekken de randstroken dus minder belasting naar zich toe, bij het versmallen van de plaat iets meer.

Ten opzichte van de referentiewaarden nemen Mplaat en Mrand zowel bij het verbreden als bij het versmallen van de plaat af. Blijkbaar ontstaan de grootste momenten bij de situatie met 2 rijstroken en bijbehorende belasting. Bij het verbreden en versmallen van de plaat varieert, naast  $b_{\text{plaat}}$ , de belasting echter ook: bij het versmallen naar één rijstrook werkt alleen de normbelasting voor de 1<sup>e</sup> rijstrook op het wegdek, terwijl bij het verbreden van het wegdek de normbelasting voor drie rijstroken op het wegdek werkt, zoals in Figuur B.1 in Bijlage B.2 te zien is. Door deze tweede variabele zijn de resultaten niet goed te vergelijken met het referentiemodel.

## 3.6 COMBINATIE-EFFECTEN

Aan de hand van de resultaten van de verschillende parameterstudies waarbij telkens één parameter werd gevarieerd, zijn er een aantal combinaties gemaakt waarbij meerdere parameters van het referentiemodel verschillen. Deze combinaties zijn gemaakt op basis van extreme waarden die zijn opgetreden bij variatie van de parameters afzonderlijk. Er is gekeken naar het gecombineerde effect van deze parameters, in vergelijking met het effect van de parameters afzonderlijk van elkaar. Het brugdek is telkens belast met de normbelasting en eigen gewicht.

Om de effecten van alle parameters met elkaar te kunnen vergelijken, zijn alle resultaten ten opzichte van eenzelfde referentiemodel beschouwd. In dit referentiemodel hebben de parameters de volgende waarden:

$d_{\text{rand}} = 590 \text{ mm}$ ;  $b_{\text{rand}} = 1 \text{ m}$ ;  $b_{\text{plaat}} = 5,5 \text{ m}$ ;  $E = 39 \text{ GPa}$

Dit referentiemodel is al gebruikt bij het variëren van  $b_{\text{rand}}$  en  $b_{\text{plaat}}$ . Bij de variatie van  $d_{\text{rand}}$  zijn alle resultaten echter bekeken ten opzichte van een situatie zonder randstroken. Om ook de resultaten uit deze parameterstudie te kunnen gebruiken, zijn de verschillen tussen optredende momenten ook ten opzichte van het bovenstaande referentiemodel bepaald. Een tabel hiervan is te vinden in Bijlage C.1, Tabel C.1.

De resultaten van de combinaties zullen hieronder beknopt worden weergegeven. Uitgebreide tabellen van alle resultaten zijn te vinden in Bijlage C.5, Tabel C.7 t/m Tabel C.11

### 3.6.1 COMBINATIE 1: STERKE TOENAME MOMENTEN

Bij deze combinatie zijn de parameters uit model M5d en M3b gecombineerd, resulterend in een brugdek met hoge, smalle randstroken. Bij beide modellen neemt de grootte van het maximale moment in de randstrook relatief veel toe ten opzichte van het referentiemodel.

TABEL 3.10 RESULTATEN COMBINATIE 1; % TOE- OF AFNAME MOMENTEN T.O.V. REFERENTIESITUATIE

*Veranderde parameters t.o.v. referentiemodel:  $d_{\text{rand}} = 900 \text{ mm}$ ,  $b_{\text{rand}} = 0,5 \text{ m}$*

|                                 | Combinatie 1  | M5d    | M3b   |
|---------------------------------|---------------|--------|-------|
| <b>Mplaat t.o.v. referentie</b> | -26,0%        | -38,8% | 15,3% |
| <b>Mrand t.o.v. referentie</b>  | <b>114,4%</b> | 48,7%  | 27,2% |

Zoals in bovenstaande tabel te zien is, neemt Mrand bijzonder veel toe ten opzichte van het referentiemodel bij combinatie van beide modellen. Mrand wordt meer dan twee keer zo groot, dit is nog een grotere waarde dan wanneer de percentages van model M5d en M3b afzonderlijk bij elkaar opgeteld zouden worden. Blijkbaar versterken deze parameters elkaar in deze situatie. Voor het moment in de plaat geldt wel dat de percentages van beide modellen afzonderlijk bij elkaar opgeteld kunnen worden om tot de waarde in het combinatiemodel te komen.

### 3.6.2 COMBINATIE 2 & 3: HOGE VERHOUDING MRAND/MPLAAT

Bij deze combinaties zijn de parameters uit model M3b en M2p gecombineerd, en vervolgens ook uit model M5d. Dit resulteert in een brugdek met een smal wegdek en smalle randstroken, waarin de randstroken vervolgens ook zijn verhoogd. Bij alle modellen afzonderlijk is de verhouding Mrand/Mplaat relatief hoog; Mrand is relatief veel groter dan Mplaat. Door deze modellen te combineren, is gekeken of deze verhouding nog groter kan worden.

TABEL 3.11 RESULTATEN COMBINATIE 2; % TOE- OF AFNAME MOMENTEN T.O.V. REFERENTIESITUATIE

*Veranderde parameters t.o.v. referentiemodel:  $b_{\text{rand}} = 0,5 \text{ m}$ ,  $b_{\text{plaat}} = 3 \text{ m}$*

|                                 | Combinatie 2 | M3b   | M2p    |
|---------------------------------|--------------|-------|--------|
| <b>Mrand/Mplaat</b>             | 2,2          | 2,2   | 2,1    |
| <b>Mplaat t.o.v. referentie</b> | -1,8%        | 15,3% | -22,8% |
| <b>Mrand t.o.v. referentie</b>  | 9,6%         | 27,2% | -18,2% |

TABEL 3.12 RESULTATEN COMBINATIE 3; % TOE- OF AFNAME MOMENTEN T.O.V. REFERENTIESITUATIE

*Veranderde parameters t.o.v. referentiemodel: b\_rand = 0,5 m, b\_plaat = 3 m, d\_rand = 900 mm*

|                                 | Combinatie 3 | M3b        | M2p        | M5d        |
|---------------------------------|--------------|------------|------------|------------|
| <b>Mrand/Mplaat</b>             | <b>6,7</b>   | <b>2,2</b> | <b>2,1</b> | <b>4,8</b> |
| <b>Mplaat t.o.v. referentie</b> | -54,0%       | 15,3%      | -22,8%     | -38,8%     |
| <b>Mrand t.o.v. referentie</b>  | 55,6%        | 27,2%      | -18,2%     | 48,7%      |

Bij combinatie 2 is de verhouding Mrand/Mplaat bij de combinatie niet bijzonder veel hoger dan bij de modellen afzonderlijk, zoals in Tabel 3.11 te zien is. Bij combinatie 3, nadat de randstroken ook verhoogd zijn, is echter wel een duidelijk verschil te zien: de verhouding Mrand/Mplaat is een stuk hoger dan bij de afzonderlijke modellen (zie Tabel 3.12). Blijkbaar heeft het verhogen van de randstroken in combinatie met een smal wegdek en smalle randstroken een hoge verhouding Mrand/Mplaat tot gevolg.

### 3.6.3 COMBINATIE 4: VERMINDEREN EFFECTEN PARAMETERS

Bij deze combinatie zijn de parameters uit model M5d en M2b gecombineerd, resulterend in een brugdek met brede, hoge randstroken. Bij model M5d neemt Mrand relatief veel toe, terwijl Mrand bij model M2b juist relatief veel afneemt. Door de modellen te combineren is gekeken of deze twee parameters elkaars effect verminderen.

TABEL 3.13 RESULTATEN COMBINATIE 4; % TOE- OF AFNAME MOMENTEN T.O.V. REFERENTIESITUATIE

*Veranderde parameters t.o.v. referentiemodel: d\_rand = 900 mm, b\_rand = 1,5 m*

|                                 | Combinatie 4 | M5d    | M2b    |
|---------------------------------|--------------|--------|--------|
| <b>Mplaat t.o.v. referentie</b> | -44,7%       | -38,8% | -8,3%  |
| <b>Mrand t.o.v. referentie</b>  | <b>22,2%</b> | 48,7%  | -14,5% |

Het verbreden van de randstroken leidt tot een duidelijke vermindering van het maximale moment dat optreedt in de randstrook, bij hoge randstroken. Op basis van het optellen van de afzonderlijke percentages zou een verschil van 34,2% worden verwacht, Mrand verschilt in de combinatie echter slechts 22,2% van de referentiewaarde.

### 3.6.4 COMBINATIE 5: STERKE AFNAME MOMENTEN

Ten slotte zijn de parameters uit model M5d en M2b gecombineerd, resulterend in een brugdek met een smal wegdek en brede randstroken. Bij beide modellen nemen Mrand en Mplaat relatief veel af. Door de modellen te combineren, is gekeken in hoeverre de parameters uit de modellen samen de momenten nog sterker verminderen.

TABEL 3.14 RESULTATEN COMBINATIE 5; % TOE- OF AFNAME MOMENTEN T.O.V. REFERENTIESITUATIE

*Veranderde parameters t.o.v. referentiemodel: b\_rand = 1,5 m, b\_plaat = 3 m*

|                                 | Combinatie 5 | M2p    | M2b    |
|---------------------------------|--------------|--------|--------|
| <b>Mplaat t.o.v. referentie</b> | -33,1%       | -22,8% | -8,3%  |
| <b>Mrand t.o.v. referentie</b>  | -31,7%       | -18,2% | -14,5% |

Beide momenten nemen bij combinatie van de parameters meer af dan in de modellen afzonderlijk, maar niet veel meer dan verwacht op basis van het optellen van de afzonderlijke percentages (zie bovenstaande tabel).

### 3.6.5 CONCLUSIE COMBINATIE-EFFECTEN

Over het algemeen geldt dat de procentuele verschillen in moment die elke parameter afzonderlijk veroorzaakt t.o.v. het referentiemodel, bij elkaar opgeteld kunnen worden om te komen tot het verschil dat de gecombineerde parameters veroorzaken t.o.v. het referentiemodel. Dit is ook te verwachten, wegens het aangenomen lineair-elastische gedrag van het brugdek. Opvallend is dat de combinatie van verhoogde en versmalde randstroken leidt tot een bijzonder groot moment, dat groter is dan de som van de afzonderlijke procentuele veranderingen.



### 3.7 CONCLUSIE PARAMETERSTUDIE RECHT BRUGDEK

Op basis van de parameterstudie met een recht brugdek kunnen conclusies worden getrokken over de invloed van de verschillende parameters op de momentenverdeling in een recht brugdek met verhoogde randstroken. In Tabel 3.15 en Tabel 3.16 staat een overzicht van alle parameters; hierin is te zien met welk percentage de momenten in het brugdek toe- of afnemen bij verandering van elke parameter, bij belasting van het brugdek met de normbelasting en het eigen gewicht.

TABEL 3.15 OVERZICHT EFFECTEN VAN VARIATIE D\_RAND EN E-MODULUS, UITGEDRUKT IN % TOE- OF AFNAME VAN MOMENTEN T.O.V. EEN PLAAT ZONDER RANDSTROKEN

|               | d_rand = 450 mm<br>(geen randstroken)<br>E = 39 GPa<br><i>Referentie</i> | d_rand = 550 mm<br><b>+22%</b> | d_rand = 590 mm<br>(werkelijke dikte)<br><b>+31%</b> | d_rand = 750 mm<br><b>+67%</b> | E = 40,7 GPa<br><b>+4,4%</b> | E = 42,2 GPa<br><b>+8,2%</b> | E = 43,6 GPa<br><b>+11,8%</b> |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| <b>Mplaat</b> | 0                                                                        | -14%                           | -19%                                                 | -38%                           | -0,8%                        | -1,6%                        | -2,3%                         |
| <b>Mrand</b>  | 0                                                                        | <b>45%</b>                     | <b>62%</b>                                           | <b>112%</b>                    | 2,8%                         | 5,3%                         | 7,6%                          |

TABEL 3.16 OVERZICHT EFFECTEN VAN VARIATIE B\_RAND EN B\_PLAAT, UITGEDRUKT IN % TOE- OF AFNAME VAN MOMENTEN T.O.V. EEN PLAAT MET RANDSTROKEN VAN 590 MM

|               | b_rand = 1 m<br>b_plaat = 5,5 m<br>d_rand = 590 mm<br><i>Referentie</i> | b_rand = 1,5 m<br><b>+50%</b> | b_rand = 0,5 m<br><b>-50%</b> | b_plaat = 3 m<br><b>-45%</b> | b_plaat = 9 m<br><b>+64%</b> |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| <b>Mplaat</b> | 0                                                                       | -8,3%                         | 15%                           | -23%                         | -5,3%                        |
| <b>Mrand</b>  | 0                                                                       | 28%                           | -36%                          | -18%                         | -18%                         |

Het is duidelijk dat het verhogen van de randstroken de meeste invloed heeft op de momentenverdeling in het brugdek. Bij toename van de dikte van de randstroken met een bepaald percentage, neemt het maximale moment in de randstroken met ongeveer het dubbele van de procentuele toename van d\_rand toe. Dit geldt voor een brugdek met de geometrie van de Halvemaansbrug, bij belasting met de normbelasting. De verandering van het maximale moment in de plaat is driemaal zo klein als de verandering van Mrand.

Een kleine afwijking van 10 mm van de dikte van de randstrook leidt tot een verandering van Mrand van maximaal 2,4% bij belasting met de normbelasting en eigen gewicht. Met alleen het eigen gewicht als belasting, verandert het moment in de randstrook maximaal 2,8%. Zulke kleine afwijkingen, bijvoorbeeld veroorzaakt door onzorgvuldigheden tijdens de bouw, hebben in een recht brugdek dus een verwaarloosbaar effect op de grootte van de momenten in het brugdek.

Het variëren van de E-modulus in plaats van de dikte in een plaat zonder randstroken, resulterend in eenzelfde stijfheid van de randstroken, heeft tot een dikte van 590 mm hetzelfde effect als het variëren van de dikte: het verschil tussen de resulterende momenten bedraagt dan minder dan 1%. Voor een dikte groter dan 650 mm bedraagt dit verschil minimaal 2,7%.

## 4 INVLOED SCHEEFSTAND BRUGDEK

Om de invloed van de scheefstand van de Halvemaansbrug op de momentenverdeling in het brugdek te onderzoeken, is een brugdek gemodelleerd met dezelfde scheefstand als de Halvemaansbrug in Scia. De afmetingen van deze brug zijn te vinden in paragraaf 2.1. In dit hoofdstuk worden eerst de resultaten besproken van de variatie van de dikte van de randstroken in het scheefstaande brugdek, vervolgens worden deze resultaten met een recht brugdek vergeleken. Daarna wordt gekeken naar de invloed van scheefstand bij verschillende belastingen, en als laatste wordt het effect van kleine variaties in de dikte van de randstroken besproken.

Aangezien uit de parameterstudie met het rechte brugdek bleek dat  $d_{\text{rand}}$  de parameter met de meeste invloed op de momentenverdeling was, is deze parameter opnieuw gevarieerd in het model van het scheefstaande brugdek. Er is onderzocht hoe groot het effect is van deze parameter op  $M_{\text{plaat}}$  en  $M_{\text{rand}}$  in het scheefstaande brugdek, en in hoeverre deze momenten verschillen van die in het rechte brugdek. De overige parameters zijn constant gehouden:

$b_{\text{rand}} = 1 \text{ m}$ ;  $b_{\text{plaat}} = 5,5 \text{ m}$ ;  $E = 39 \text{ GPa}$

Bij het variëren van deze parameter is het brugdek telkens belast met de normbelasting, bestaande uit een verdeelde belasting en stelsels puntlasten, en het eigen gewicht van het brugdek. Hoe deze belastingen precies op het scheve brugdek zijn geplaatst, is te vinden in paragraaf 2.3.2.

Een groot verschil tussen een recht en een scheefstaand brugdek is dat de maximale momenten in de randstroken en in de plaat niet meer in het midden van de overspanning optreden, maar op een andere locatie. Er kan dus niet meer naar het momentenverloop in de middendoorsnede gekeken worden, zoals bij het rechte brugdek is gedaan. De grootte van  $M_{\text{plaat}}$  en  $M_{\text{rand}}$  is daarom op een andere manier bepaald. De waarde van  $M_{\text{rand}}$  wordt als maximaal moment in het model in Scia weergegeven. Aangezien  $M_{\text{plaat}}$  kleiner is dan  $M_{\text{rand}}$  (behalve bij een plaat zonder randstroken), wordt  $M_{\text{plaat}}$  niet in Scia weergegeven als maximaal moment: om de grootte van dit moment te bepalen is gekeken naar de grootte van het moment in knopen op de locatie waar  $M_{\text{plaat}}$  optreedt. Een uitgebreide beschrijving hiervan is te vinden in paragraaf 2.4.2.

### 4.1 RESULTATEN VARIATIE DIKTE RANDSTROKEN

In Tabel 4.1 zijn de resultaten weergegeven van de variatie van  $d_{\text{rand}}$ . Er is met 10 mm gevarieerd rondom de werkelijke dikte van  $d_{\text{rand}}$ , 590 mm, om de invloed van kleine variaties op de momentenverdeling te zien. Daarnaast is ook breder gevarieerd, van de situatie zonder randstroken ( $d_{\text{rand}} = 450 \text{ mm}$ ) tot een dikte van 750 mm. In Tabel 4.2 zijn de resultaten weergegeven van de variatie van  $d_{\text{rand}}$  in het rechte brugdek, ter vergelijking. In Bijlage D is voor elke variatie van  $d_{\text{rand}}$  het momentenverloop in de gehele plaat en de locatie van  $M_{\text{rand}}$  en  $M_{\text{plaat}}$  weergegeven.

TABEL 4.1 RESULTATEN VARIATIE  $D_{\text{RAND}}$  IN SCHEEF BRUGDEK, BELAST MET NORMBELASTING + E.G.; % TOE- OF AFNAME MOMENTEN T.O.V. RECHT BRUGDEK

| $d_{\text{rand}}$ [mm]                                        | 450    | 550    | 580    | 590 <sup>1</sup> | 600    | 750    |
|---------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|------------------|--------|--------|
| Scheefstaand brugdek                                          | M1s    | M2s    | M3s    | M4s              | M5s    | M6s    |
| Geen randstroken                                              |        |        |        |                  |        |        |
| $M_{\text{plaat}}$ , scheef [kNm/m]                           | 369,93 | 328,15 | 315,32 | 311,08           | 306,88 | 250,2  |
| $M_{\text{rand}}$ , scheef [kNm/m]                            | 344,12 | 478,99 | 518,53 | 531,2            | 543,61 | 699,02 |
| Verhouding $M_{\text{rand}}/M_{\text{plaat}}$                 | 0,9    | 1,5    | 1,6    | 1,7              | 1,8    | 2,8    |
| $M_{\text{plaat}}$ , scheef t.o.v. $M_{\text{plaat}}$ , recht | 4,3%   | 7,1%   | 8,1%   | 8,4%             | 8,7%   | 13,9%  |
| $M_{\text{rand}}$ , scheef t.o.v. $M_{\text{rand}}$ , recht   | -1,5%  | -5,7%  | -5,9%  | -5,9%            | -5,9%  | -5,5%  |

<sup>1</sup> Werkelijke dikte randstroken Halvemaansbrug

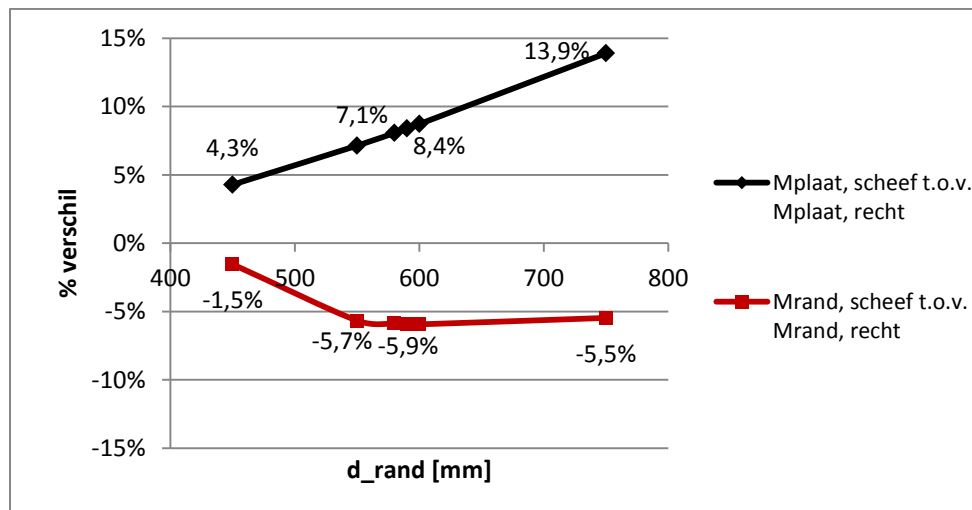
TABEL 4.2 RESULTATEN VARIATIE D\_RAND IN RECHT BRUGDEK TER VERGELIJKING, MET NORMBELASTING + E.G.

| d_rand [mm]             | 450    | 550    | 580    | 590    | 600    | 750    |
|-------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Recht brugdek           | M1d    | M2d    | M7d    | M3d    | M8d    | M5d    |
| Mplaat, recht [kNm/m]   | 354,72 | 306,28 | 291,76 | 286,99 | 282,26 | 219,66 |
| Mrand, recht [kNm/m]    | 349,52 | 507,75 | 550,79 | 564,52 | 577,92 | 739,43 |
| Verhouding Mrand/Mplaat | 1,0    | 1,7    | 1,9    | 2,0    | 2,1    | 3,4    |

Net als bij de variatie van d\_rand in het rechte brugdek, trekken de randstroken van het scheve brugdek steeds meer belasting naar zich toe naarmate d\_rand toeneemt. Hierdoor wordt Mrand steeds groter en neemt Mplaat af.

## 4.2 VERGELIJKING RESULTATEN MET RECHT BRUGDEK

De grootte van de momenten die in de randstroken en de plaat van het scheefstaande brugdek ontstaan, verschillen van de momenten die ontstaan in een recht brugdek: Mplaat is in een scheef brugdek groter dan in een recht brugdek, terwijl Mrand juist kleiner is in een scheef brugdek. In Figuur 4.1 is dit verschil weergegeven; het procentuele verschil van Mplaat en Mrand in het scheve brugdek t.o.v. Mplaat en Mrand in een recht brugdek is uitgezet tegen de dikte van de randstroken, d\_rand.

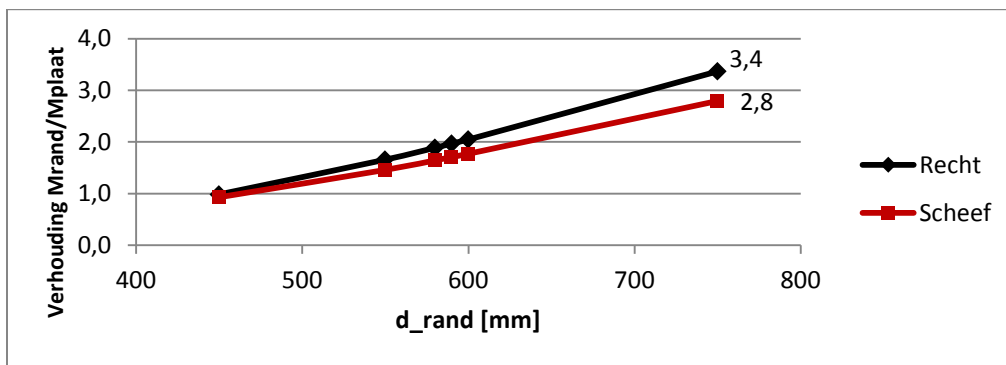


FIGUUR 4.1 PROCENTUELE VERSCHIL VAN MRAND EN MPLAAT IN HET SCHEVE BRUGDEK T.O.V. MRAND EN MPLAAT IN EEN RECHT BRUGDEK

Uit de grafiek blijkt dat voor een plaat zonder randstroken ( $d_{\text{rand}} = 450$  mm) scheefstand van het brugdek weinig invloed heeft op de momenten in het brugdek: het verschil tussen momenten in een scheef en een recht brugdek bedraagt maximaal 4,3%. In dat geval kan scheefstand dus verwaarloosd worden.

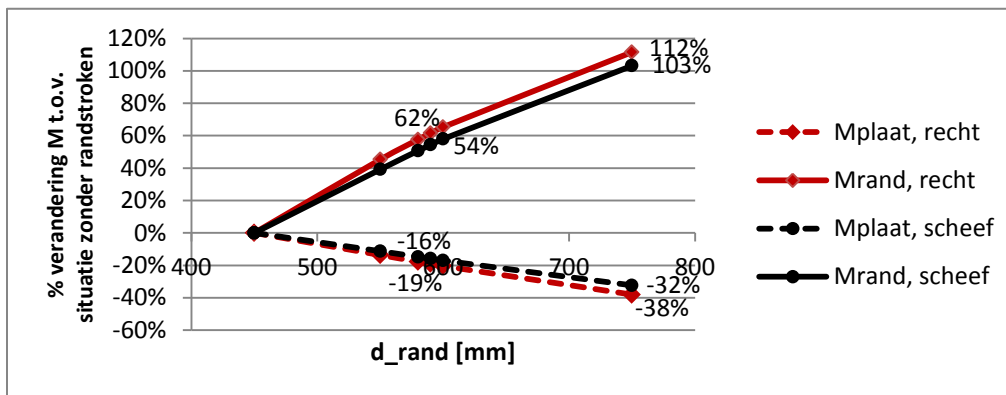
Naarmate  $d_{\text{rand}}$  toeneemt, wordt het verschil tussen de momenten in een recht en scheef brugdek steeds groter; bij de werkelijke dikte van de randstroken (590 mm) bedraagt dit verschil al maximaal 8,4%. Het verschil tussen Mplaat in een recht en een scheef brugdek blijft toenemen naarmate  $d_{\text{rand}}$  toeneemt, tot een verschil van 14% bij een dikte van 750 mm. Het verschil tussen Mrand in een recht en een scheef brugdek blijft vanaf  $d_{\text{rand}} = 550$  mm redelijk constant met een waarde tussen 5,5% en 5,9%.

In Figuur 4.2 is het verloop van de verhouding Mrand/Mplaat bij een recht en een scheef brugdek weergegeven. De waarden waarop deze grafiek gebaseerd is, zijn te vinden in Tabel 4.1 en Tabel 4.2. De verhouding Mrand/Mplaat in een scheef brugdek blijkt kleiner te zijn dan in een recht brugdek; Mrand is in een scheefstaand brugdek blijkbaar relatief minder groot ten opzichte van Mplaat.



FIGUUR 4.2 VERHOUDING MRAND/MPLAAT VOOR HET RECHTE EN SCHEVE BRUGDEK

In Figuur 4.3 is de procentuele verandering van Mplaat en Mrand ten opzichte van de momenten in een brugdek zonder randstroken weergegeven, voor zowel het scheefstaande brugdek als het rechte brugdek. De waarden waarop deze grafiek gebaseerd is, zijn te vinden in Tabel 3.1 (recht brugdek) en Tabel D.1 (scheefstaand brugdek) in Bijlage D.



FIGUUR 4.3 % TOE- EN AFNAME MOMENTEN TEN OPZICHT VAN REFERENTIESITUATIE ZONDER RANDSTROKEN

Uit bovenstaande grafiek blijkt dat Mplaat en Mrand in een scheef brugdek iets minder veranderen ten opzichte van de situatie zonder randstroken dan in een recht brugdek, naarmate d\_rand toeneemt. Dit verschil is echter niet bijzonder groot. Wat vooral opvalt, is dat variatie van d\_rand veel meer invloed heeft op de momenten in het brugdek dan scheefstand van het brugdek: Door variatie van d\_rand verschillen momenten maximaal 112% van de situatie zonder randstroken, terwijl momenten door scheefstand van het brugdek maar maximaal 9% verschillen van momenten in een recht brugdek. Scheefstand is dus eerder te verwaarlozen dan dikte van de randstroken.

### 4.3 INVLOED VAN SCHEEFSTAND VOOR VERSCHILLENDE BELASTINGEN

De effecten van scheefstand van een brugdek zijn in de voorgaande paragraaf alleen onderzocht voor belasting met de normbelasting en eigen gewicht. Het is echter niet duidelijk of deze effecten gelden voor elke soort belasting of dat deze effecten specifiek zijn voor dat bepaalde belastingsgeval. Daarom zijn de effecten van scheefstand ook voor twee andere belastingsgevallen onderzocht.

Als eerste is het effect van uitsluitend het eigen gewicht onderzocht. Vervolgens is het brugdek belast met tandemstelsel 1, oftewel het stelsel aslasten dat op de zwaarst belaste rijstrook staat. Dit stelsel aslasten bestaat uit vier puntlasten van elk 135 kN, zie ook paragraaf 2.3.2. D\_rand is opnieuw gevarieerd; er is gekeken naar de situatie zonder randstroken (d\_rand = 450 mm), de werkelijke situatie (d\_rand = 590 mm) en kleine variaties rondom de werkelijke situatie. In Tabel 4.3 zijn de resultaten voor het rechte brugdek weergegeven. In Tabel 4.4 zijn de resultaten voor het scheefstaande brugdek weergegeven, en het percentage verschil ten opzichte van het rechte brugdek voor elke waarde.

TABEL 4.3 RESULTATEN BELASTING RECHT BRUGDEK MET EIGEN GEWICHT EN TANDEMSTELSEL 1

| Recht brugdek         | d_rand [mm]        | 450              | 580    | 590    | 600    |
|-----------------------|--------------------|------------------|--------|--------|--------|
|                       |                    | geen randstroken |        |        |        |
| Eigen gewicht (EG)    | Mplaat-EG [kNm/m]  | 69,42            | 56,91  | 56,01  | 55,12  |
|                       | Mrand-EG [kNm/m]   | 70,93            | 116,85 | 120,19 | 123,49 |
|                       | Mrand/Mplaat       | 1,0              | 2,1    | 2,1    | 2,2    |
| Tandemstelsel 1 (TS1) | Mplaat-TS1 [kNm/m] | 139,98           | 107,48 | 105,34 | 103,31 |
|                       | Mrand-TS1 [kNm/m]  | 141,46           | 218,04 | 223,37 | 228,85 |
|                       | Mrand/Mplaat       | 1,0              | 2,0    | 2,1    | 2,2    |

TABEL 4.4 RESULTATEN BELASTING SCHEEF BRUGDEK MET E.G. EN TANDEMSTELSEL 1; % VERSCHIL MOMENTEN T.O.V. RECHT BRUGDEK

| Scheefstaand brugdek  | d_rand [mm]                        | 450              | 580    | 590    | 600    |
|-----------------------|------------------------------------|------------------|--------|--------|--------|
|                       |                                    | geen randstroken |        |        |        |
| Eigen gewicht (EG)    | Mplaat-EG [kNm/m]                  | 71,63            | 59,7   | 58,87  | 58,05  |
|                       | % verschil Mplaat-EG t.o.v. recht  | 3,2%             | 4,9%   | 5,1%   | 5,3%   |
|                       | Mrand-EG [kNm/m]                   | 71,25            | 117,63 | 121,01 | 124,34 |
|                       | % verschil Mrand-EG t.o.v. recht   | 0,45%            | 0,67%  | 0,68%  | 0,69%  |
|                       | Mrand/Mplaat                       | 1,0              | 2,0    | 2,1    | 2,1    |
| Tandemstelsel 1 (TS1) | Mplaat-TS1 [kNm/m]                 | 147,48           | 119,49 | 117,52 | 115,58 |
|                       | % verschil Mplaat-TS1 t.o.v. recht | 5,4%             | 11,2%  | 11,6%  | 11,9%  |
|                       | Mrand-TS1 [kNm/m]                  | 138,91           | 204,31 | 208,91 | 213,39 |
|                       | % verschil Mrand-TS1 t.o.v. recht  | -1,8%            | -6,3%  | -6,5%  | -6,8%  |
|                       | Mrand/Mplaat                       | 0,9              | 1,7    | 1,8    | 1,8    |

Uit bovenstaande tabellen kan geconcludeerd worden dat scheefstand van het brugdek verwaarloosd kan worden bij belasting met uitsluitend eigen gewicht, ook bij verhoogde randstroken. Het verschil tussen momenten in een recht en scheefstaand brugdek bedraagt bij deze belasting maximaal 5,3%.

Bij belasting van het brugdek door tandemstelsel 1 heeft scheefstand duidelijk meer invloed op de momentenverdeling in het brugdek: bij een dikte van de randstroken van 600 mm verschillen momenten in een scheef brugdek met maximaal 12% van momenten in een recht brugdek. Bij belasting met de normbelasting en het eigen gewicht, is het maximale verschil tussen momenten in een recht en scheef brugdek maximaal 8,7%<sup>1</sup>. De invloed van scheefstand op momenten in het brugdek is dus afhankelijk van het belastingsgeval dat op het brugdek werkt, en de locatie hiervan.

Voor beide belastingsgevallen geldt dat scheefstand weinig invloed heeft op momenten in een brugdek zonder randstroken ( $d_{\text{rand}} = 450$  mm). Momenten in een scheefstaand brugdek zonder randstroken verschillen maximaal 5,4% van momenten in een recht brugdek.

Wat opvalt, is dat de verhouding  $M_{\text{rand}}/M_{\text{plaat}}$  in een scheefstaand brugdek weinig verschilt van die verhouding in een recht brugdek, bij belasting met eigen gewicht. In Tabel 4.1 en Figuur 4.2 is echter te zien dat, bij belasting met de normbelasting en eigen gewicht, de verhouding  $M_{\text{rand}}/M_{\text{plaat}}$  in een scheefstaand brugdek voor elke dikte van de randstroken kleiner is dan in een recht brugdek. Bij belasting met uitsluitend tandemstelsel 1 is dit ook het geval (zie Tabel 4.4); de toename van  $M_{\text{rand}}$  is in een scheefstaand brugdek kleiner dan in een recht

<sup>1</sup> Zie paragraaf 4.1, Tabel 4.1, tot een waarde voor  $d_{\text{rand}}$  van 600 mm bekeken.

brugdek. Blijkbaar is deze verhouding alleen lager in een scheefstaand brugdek dan in een recht brugdek als er sprake is van een belasting die niet gelijkmatig over het hele brugdek verdeeld is, zoals een tandemstelsel. Bij een belasting die wel gelijkmatig over het hele brugdek is verdeeld, zoals eigen gewicht, verschilt de verhouding  $M_{rand}/M_{plaat}$  nauwelijks van die verhouding in een recht brugdek.

#### 4.4 EFFECTEN VAN KLEINE VARIATIES IN DE DIKTE VAN DE RANDSTROKEN

In paragraaf 3.2.2 is voor een recht brugdek al gekeken naar het effect van kleine variaties van  $d_{rand}$ , om de gevolgen van bijvoorbeeld een verkeerde aanname van de dikte of een constructiefout in beeld te brengen. Dit is in onderstaande tabellen uitgebreid naar een scheefstaand brugdek, en verschillende belastingsgevallen: hiervoor zijn dezelfde resultaten als in de voorgaande paragraaf gebruikt. Voor elk moment is gekeken hoe groot het verschil is ten opzichte van de referentiewaarde; als referentie is de situatie met randstroken van 590 mm dik, zoals in werkelijkheid, gebruikt. Dit is gedaan voor randstroken van 10 mm hoger en lager dan 590 mm, en voor de situatie zonder randstroken ( $d_{rand} = 450$  mm).

TABEL 4.5 RESULTATEN BELASTING RECHT BRUGDEK MET EIGEN GEWICHT EN TANDEMSTELSEL 1; VERGELIJKING T.O.V. REFERENTIE

| Recht brugdek                | $d_{rand}$ (mm)        | 450              | 580    | 590        | 600    |
|------------------------------|------------------------|------------------|--------|------------|--------|
|                              |                        | geen randstroken |        | referentie |        |
| T.g.v. eigen gewicht (EG)    | Mplaat-EG [kNm/m]      | 69,42            | 56,91  | 56,01      | 55,12  |
|                              | % verschil t.o.v. ref. | 23,9%            | 1,6%   |            | -1,6%  |
|                              | Mrand-EG [kNm/m]       | 70,93            | 116,85 | 120,19     | 123,49 |
|                              | % verschil t.o.v. ref. | -41,0%           | -2,8%  |            | 2,7%   |
| T.g.v. tandemstelsel 1 (TS1) | Mplaat-TS1 [kNm/m]     | 139,98           | 107,48 | 105,34     | 103,31 |
|                              | % verschil t.o.v. ref. | 32,9%            | 2,0%   |            | -1,9%  |
|                              | Mrand-TS1 [kNm/m]      | 141,46           | 218,04 | 223,37     | 228,85 |
|                              | % verschil t.o.v. ref. | -36,7%           | -2,4%  |            | 2,5%   |

TABEL 4.6 RESULTATEN BELASTING SCHEEFSTAAND BRUGDEK MET EIGEN GEWICHT EN TANDEMSTELSEL 1; VERGELIJKING T.O.V. REFERENTIE

| Scheefstaand brugdek         | $d_{rand}$ [mm]     | 450              | 580    | 590        | 600    |
|------------------------------|---------------------|------------------|--------|------------|--------|
|                              |                     | geen randstroken |        | referentie |        |
| T.g.v. eigen gewicht (EG)    | Mplaat-EG [kNm/m]   | 71,63            | 59,7   | 58,87      | 58,05  |
|                              | % verschil tov ref. | 21,7%            | 1,4%   |            | -1,4%  |
|                              | Mrand-EG [kNm/m]    | 71,25            | 117,63 | 121,01     | 124,34 |
|                              | % verschil tov ref. | -41,1%           | -2,8%  |            | 2,8%   |
| T.g.v. tandemstelsel 1 (TS1) | Mplaat-TS1 [kNm/m]  | 147,48           | 119,49 | 117,52     | 115,58 |
|                              | % verschil tov ref. | 25,5%            | 1,7%   |            | -1,7%  |
|                              | Mrand-TS1 [kNm/m]   | 138,91           | 204,31 | 208,91     | 213,39 |
|                              | % verschil tov ref. | -33,5%           | -2,2%  |            | 2,1%   |

Een kleine afwijking in de dikte van de randstroken van 10 mm blijkt geen significante gevolgen te hebben voor de momenten die in het brugdek optreden: de optredende momenten verschillen 1-3% van de momenten die zonder afwijking zouden optreden. In paragraaf 3.2.2 bleek al dat een kleine afwijking in  $d_{rand}$  geen grote invloed heeft op de resulterende momenten in het brugdek<sup>1</sup>, in het geval van een rechte brug die belast wordt met de normbelasting. De invloed van deze afwijking wordt blijkbaar niet groter bij scheefstand van de brug, of bij het belasten van de brug met uitsluitend het eigen gewicht of tandemstelsel 1.

<sup>1</sup> Een afwijking van 10 mm van  $d_{rand}$  heeft hier een verschil in momenten van maximaal 2,5% tot gevolg.

## 5 VERGELIJKING NORMBELASTING MET PROEFBELASTING

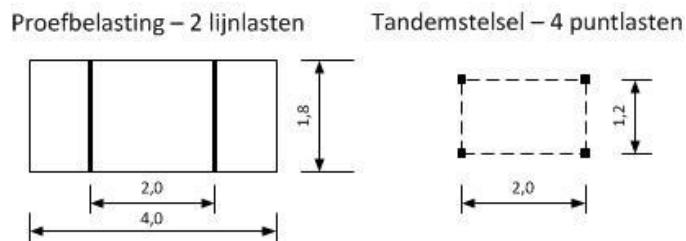
Bij het beproeven van de Halvemaansbrug in mei 2014 is de brug niet belast met de normbelasting volgens NEN-EN 1991-2, bestaande uit tandemstelsels en een verdeelde belasting, maar met een proefbelasting bestaande uit twee lijnlasten. Om te zien in hoeverre deze proefbelasting de momentenverdeling als gevolg van de normbelasting benadert, zijn deze met elkaar vergeleken. Dit is gedaan voor het werkelijke scheefstaande brugdek, met randstroken van 590 mm dik.

### 5.1 INVOER PROEFBELASTING IN MODEL

De proefbelasting bestaat uit contragewichten, die opgelegd zijn op twee baddingen die 2,0 m uit elkaar liggen en 1,8 m lang zijn. Op deze manier wordt het brugdek dus belast met twee lijnlasten. De proefbelasting bedraagt maximaal 100 ton, dit komt overeen met 8 contragewichten van 12,5 ton<sup>1</sup>.

Deze maximale proefbelasting leidt tot een lijnlast van  $F = \frac{100.000 \text{ kg} \cdot 9,81}{2 \cdot 1,8 \text{ m}} = 272,5 \text{ kN/m}$  per oplegging.

In het model wordt deze proefbelasting niet als lijnlast gemodelleerd, maar wordt het bestaande tandemstelsel 1 (TS1) uit de normbelasting gebruikt om deze proefbelasting te modelleren. Dit tandemstelsel bestaat uit vier puntlasten, die net als de lijnlasten 2,0 m uit elkaar liggen (zie ook paragraaf 2.3). Door deze puntlasten een waarde te geven die overeenkomt met grootte van de proefbelasting, kan het effect van de proefbelasting makkelijk worden onderzocht, zonder dat er een heel nieuw belastingsgeval gemodelleerd hoeft te worden. In onderstaande figuur zijn de proefbelasting en het tandemstelsel weergegeven.



FIGUUR 5.1 AFMETINGEN PROEFBELASTING (CONTRAGEWICHT OPGELEGD OP BADDINGEN) EN TANDEMSTELSEL (UIT NORMBELASTING) [M]

De grootte van de lijnlast is omgerekend naar de puntlasten uit het tandemstelsel. Elke lijnlast van 272,5 kN/m wordt verdeeld over twee puntlasten:

$F_{\text{puntlast}} = \frac{272,5 \text{ kN/m} \cdot 1,8 \text{ m}}{2} = 245,3 \text{ kN}$  per puntlast. De proefbelasting wordt dus gemodelleerd als een tandemstelsel met vier puntlasten van elk 245,3 kN.

Volgens de norm moet TS1 in totaal bestaan uit een belasting van 600 kN. Verdeeld over vier puntlasten en inclusief een reductiefactor<sup>2</sup> ( $\alpha_Q$ ) van 0,9, zonder belastingsfactor, komt dit neer op een belasting van 135 kN per puntlast. Het tandemstelsel dat als proefbelasting op het brugdek werkt is dus, met een belasting van 245,3 kN/puntlast, 1,8 x zo groot als TS1.

### 5.2 VERGELIJKING MOMENTENVERDELINGEN

Om de momentenverdelingen die ontstaan als gevolg van de twee belastingen te vergelijken, is gekeken naar de grootte van de volgende momenten in het brugdek:

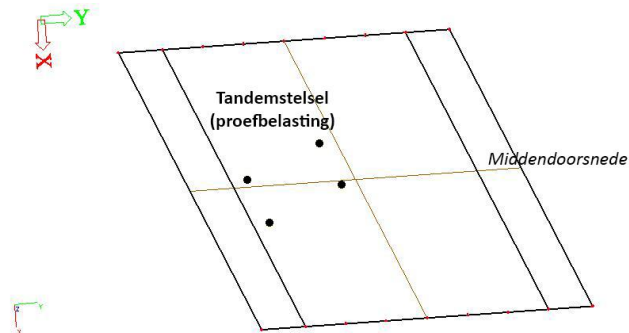
- Mplaat; het maximale moment in de plaat
- Mrand; het maximale moment in de randstroken
- Mplaat – middendoorsnede: het maximale moment in de plaat dat in het midden van de overspanning (middendoorsnede) optreedt

<sup>1</sup> Fennis, S.A.A.M. (2014). *Meetprotocol TU Delft voor proefbelasten Halvemaansbrug*.

<sup>2</sup> Zie paragraaf 2.3.1

- Mrand – middendoorsnede: het max. moment in de randstroken dat in het midden van de overspanning optreedt

In Figuur 5.2 is de locatie van het tandemstelsel dat als proefbelasting op het brugdek werkt weergegeven, en de middendoorsnede van het brugdek.



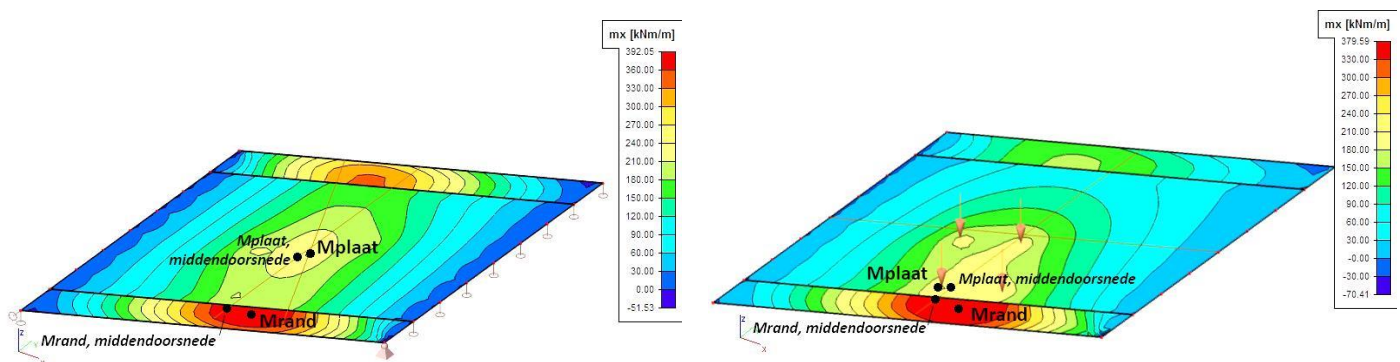
FIGUUR 5.2 LOCATIE TANDEMSTELSEL (PROEFBELASTING) EN MIDDENDOORSNEDE

Voor elk moment is bepaald met hoeveel procent dit moment ten gevolge van de proefbelasting verschilt van het moment ten gevolge van de normbelasting inclusief een belastingsfactor van 1,25. Eigen gewicht is hier buiten beschouwing gelaten, aangezien deze voor beide belastingen in principe gelijk is. Het verschil tussen de norm- en proefbelasting bestaat uit het tweede tandemstelsel en de verdeelde belasting die bij de normbelasting aanwezig is, hier wordt het eigen gewicht niet door beïnvloed. In onderstaande tabel zijn de resultaten van de vergelijking van beide belastingen te zien.

TABEL 5.1 RESULTATEN VERGELIJKING PROEFBELASTING MET NORMBELASTING; % VERSCHIL MOMENTEN T.G.V. PROEFBELASTING T.O.V. NORMBELASTING

|                                  | Normbelasting:<br>TS1, TS2 + verdeelde belasting <sup>1</sup><br>+ belastingsfactor van 1,25 | Proefbelasting:<br>100 ton<br>= 4x puntlast van 245,3 kN | % verschil proefbelasting<br>t.o.v. normbelasting |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Mplaat [kNm/m]                   | 243,56                                                                                       | 213,54                                                   | -12,33%                                           |
| Mrand [kNm/m]                    | 392,05                                                                                       | 379,59                                                   | -3,18%                                            |
| Mplaat – middendoorsnede [kNm/m] | 237,67                                                                                       | 206,83                                                   | -12,98%                                           |
| Mrand – middendoorsnede [kNm/m]  | 389,21                                                                                       | 379,59                                                   | -2,47%                                            |

De momentenverdeling in het hele brugdek als gevolg van de normbelasting en de proefbelasting, en de plaats van optreden van de verschillende momenten, is in onderstaande figuren weergegeven.



FIGUUR 5.3 MOMENTENVERDELING T.G.V. NORMBELASTING (LINKS) EN T.G.V. PROEFBELASTING (RECHTS); PLAATS VAN OPTREDEN VAN DE MOMENTEN

<sup>1</sup> Exacte waarden van deze belastingen zijn te vinden in paragraaf 2.3.1.



Bij het gebruik van een belastingsfactor van 1,25 en een reductiefactor van 0,9 komen de norm- en proefbelasting goed overeen wat betreft de resulterende maximale momenten in de randstroken: Deze maximale momenten treden voor de norm- en de proefbelasting op dezelfde plek in de randstrook op. De momenten die door de proefbelasting optreden, verschillen maar 3% in grootte van de momenten ten gevolge van de normbelasting. De momentenverdeling in de randstrook waar de maximale momenten niet optreden, verschilt wel voor beide belastingen.

De momentenverdeling in de plaat komt in dit geval voor de norm- en proefbelasting minder goed overeen: bij belasting met de normbelasting treden de maximale momenten rond het midden van de plaat op, terwijl de momenten ten gevolge van de proefbelasting bij de rand van de plaat optreden, rond een van de puntlasten (zie Figuur 5.3). Dit verschil kan verklaard worden door het feit dat er bij de normbelasting naast TS1 ook een tweede tandemstelsel en verdeelde belasting op de brug werkt. Doordat deze extra belastingen op een andere locatie aangrijpen dan de proefbelasting, die uit uitsluitend één tandemstelsel bestaat, treden de maximale momenten in de plaat ook op een andere locatie op. Ook de waarden van deze maximale momenten zijn verschillend; de momenten die ten gevolge van de proefbelasting optreden, verschillen met bijna 13% in grootte van de momenten ten gevolge van de normbelasting.

Wat opvalt, is dat alle momenten ten gevolge van de proefbelasting kleiner zijn dan de momenten ten gevolge van de normbelasting. Dit verschil is echter sterk afhankelijk van de grootte van de belastingsfactor die wordt gebruikt voor de normbelasting, en of er reductiefactoren ( $\alpha_Q$ ,  $\alpha_q$ ) in de normbelasting zijn meegenomen. Als er een hogere belastingsfactor wordt toegepast, dan wordt het verschil tussen de norm- en proefbelasting nog groter; de normbelasting en de hierdoor optredende momenten worden in dat geval namelijk groter. Ook als er geen reductiefactor van 0,9 wordt toegepast, wordt het verschil tussen de norm- en proefbelasting groter; in dat geval worden de normbelasting en de hierdoor optredende momenten ook groter. Bij het gebruik van een lagere belastingsfactor, bijvoorbeeld 1,2, wordt dit verschil juist minder groot, aangezien de normbelasting dan wordt verminderd. In dat geval zouden de momenten ten gevolge van de proefbelasting wel groter kunnen zijn dan ten gevolge van de normbelasting. Ook beïnvloedt het meenemen van een belastingsfactor voor het eigen gewicht, als deel van de normbelasting, de grootte van de optredende momenten. Hierdoor kan het verschil tussen de norm- en proefbelasting ook veranderen.

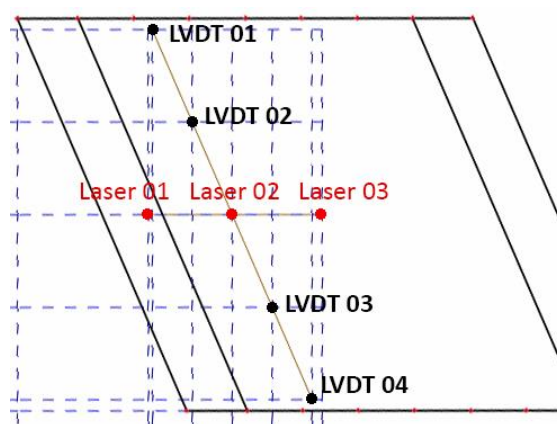
Daarnaast heeft de manier van modelleren van de proefbelasting invloed op de grootte van het verschil tussen de belastingen. In dit geval is de proefbelasting gemodelleerd als vier puntlasten, terwijl deze belasting in werkelijkheid als een dubbele lijnlast op het brugdek werkt. Ook kan de precieze locatie van de gebruikte puntlasten iets verschillen van de locatie van de lijnlasten. Het verschil tussen het effect van de norm- en proefbelasting is dus afhankelijk van veel factoren, en kan niet eenvoudig worden bepaald.

## 6 CONTROLE MODEL MET MEETRESULTATEN BEPROEVING HALVEMAANSBRUG

Om te controleren in hoeverre het gemodelleerde brugdek het werkelijke brugdek van de Halvemaansbrug benadert, zijn de uitkomsten van het model vergeleken met meetresultaten die zijn verkregen tijdens het proefbelasten van de Halvemaansbrug in mei 2014. Deze meetresultaten laten het werkelijke gedrag van het brugdek zien. De manier waarop het proefbelasten van de brug is uitgevoerd en de meetresultaten zijn verkregen is beschreven in het 'Meetprotocol TU Delft voor proefbelasten Halvemaansbrug'<sup>1</sup>.

### 6.1 BEPALEN VERPLAATSINGEN IN SCIA

Tijdens de beproeving van het brugdek is onder andere de verplaatsing gemeten van verschillende punten op het brugdek, door middel van LVDT's (Linear Variable Differential Transformer); dit zijn sensoren die lineaire verplaatsing meten, en door middel van lasers, die ook verplaatsing registreren. De locatie van deze sensoren is met behulp van een raster in Scia op het model van het brugdek aangegeven, dit is weergegeven in onderstaande figuur. In Bijlage E, Figuur E.1, zijn de precieze afmetingen van dit raster te vinden.



FIGUUR 6.1 LOCATIE LASERS EN LVDT'S OP BRUGDEK

Voor diezelfde punten op het brugdek is de verplaatsing bepaald die optreedt in het model in Scia, ten gevolge van eenzelfde belasting als tijdens de beproeving van de brug. Deze verplaatsing is bepaald door naar de verplaatsing te kijken in de knoop die het dichtste bij elke meetlocatie ligt. Om deze verplaatsing zo nauwkeurig mogelijk te kunnen bepalen, is de elementgrootte van het eindige elementen-net verkleind naar 0,05 m.

Het brugdek is tijdens de beproeving in stappen belast met een steeds grotere belasting. Deze belasting is tijdens de proef als dubbele lijnlast op het brugdek gezet. Een tabel met de verschillende belastingsstappen is te vinden in Bijlage E, Tabel E.1. Twee van deze belastingsstappen zijn in het model van het scheefstaande brugdek gemodelleerd: belasting met 75,1 ton en maximale belasting met 90,2 ton. Deze proefbelasting is in het model als tandemstelsel (TS) gemodelleerd dat bestaat uit vier puntlasten, zie ook paragraaf 5.1. De grootte die deze puntlasten hebben om voor een belasting te zorgen gelijk aan de twee lijnlasten van de proefbelasting, is voor beide belastingsstappen te vinden in Tabel E.1. Met deze belastingen zijn de verplaatsingen van de verschillende punten op het gemodelleerde brugdek bepaald en vergeleken met de gemeten verplaatsing tijdens de beproeving.

Op basis van een spreadsheet met alle gemeten waarden tijdens de proef is voor beide belastingsstappen de waarde van de gemeten verplaatsing in elk punt bepaald. Dit is gedaan door telkens de grootste geregistreerde verplaatsing van een punt te bepalen, binnen de duur van de belastingsstap. Hierbij is gecontroleerd dat dit maximum dicht bij de gemiddelde waarde voor de verplaatsing ligt, en daarmee realistisch is. In Bijlage E, Figuur E.2, is een grafiek weergegeven met de geregistreerde verplaatsing in elk meetpunt voor de gehele duur van de proef. In deze grafiek is ook aangegeven welk deel van de grafiek bij de twee belastingsstappen hoort.

<sup>1</sup> Fennis, S.A.A.M. (2014). *Meetprotocol TU Delft voor proefbelasten Halvemaansbrug*.

## 6.2 VERGELIJKING MEETWAARDEN MET RESULTATEN SCIA

In Tabel 6.1 en Tabel 6.2 is voor elk punt waarop gemeten is, de maximale gemeten verplaatsing tijdens het proefbelasten en de verplaatsing in het model in Scia weergegeven, voor belasting met 75,1 ton en 90,2 ton. In de kolom naast de verplaatsingen in het model in Scia is de grootte van de afwijking van deze verplaatsing weergegeven, ten opzichte van de gemeten verplaatsing.

De verschillen tussen de gemeten verplaatsingen en de verplaatsingen in Scia blijken erg groot te zijn, bij een aantal meetpunten wijkt de verplaatsing in Scia meer dan 100% af van de gemeten verplaatsing. Alleen voor LVDT01 is de verplaatsing in Scia ongeveer even groot als de werkelijke verplaatsing. Het model van het brugdek lijkt dus geen realistisch model te zijn van de werkelijke brug.

Een parameter in het model die veel invloed heeft op de krachtsverdeling in het brugdek en waar onzekerheid over was tijdens het modelleren van het brugdek, is de manier waarop de brug is opgelegd. In het model is het brugdek aan beide kanten 'glijdend' opgelegd; beweging in de x- en y-richting en rotatie in alle richtingen is mogelijk (zie ook paragraaf 2.2). Het zou kunnen dat deze manier van opleggen niet overeenkomt met de werkelijkheid, en de oorzaak is van de grote afwijkingen. Om dit te onderzoeken, is ook voor een brugdek met een ander type oplegging onderzocht hoe groot de verplaatsingen zijn ten gevolge van de proefbelasting. In dat model is beweging in de x- en y-richting in de opleggingen niet meer mogelijk, rotatie nog wel. Deze manier van opleggen zal in het vervolg 'vaste opleggingen' worden genoemd, en komt overeen met puntoplegging 1, zie paragraaf 2.2.1. De verplaatsingen die optreden bij belasting van dit model en de afwijking ten opzichte van de meetwaarden zijn weergegeven in Tabel 6.1 en Tabel 6.2, in de laatste twee kolommen.

TABEL 6.1 VERGELIJKING GEMETEN VERPLAATSING MET VERPLAATSING IN MODEL; VOOR BELASTING MET 75,1 TON

| Belasting:<br>75,1 ton of<br>184,2 kN/puntlast (TS) | Max. gemeten<br>verplaatsing<br>[mm] | Verplaatsing<br>(Uz) in Scia<br>[mm] | % afwijking<br>model t.o.v.<br>gemeten waarde | Verplaatsing (Uz) in<br>Scia; vaste<br>opleggingen [mm] | % afwijking<br>t.o.v. gemeten<br>waarde |
|-----------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| LVDT01                                              | -0,215                               | -0,2                                 | -7,1%                                         | -0,1                                                    | -53,5%                                  |
| LVDT02                                              | -0,989                               | -1,55                                | 56,8%                                         | -1                                                      | 1,2%                                    |
| LVDT03                                              | -0,851                               | -1,5                                 | 76,3%                                         | -1                                                      | 17,6%                                   |
| LVDT04                                              | -0,087                               | -0,2                                 | 130,3%                                        | -0,1                                                    | 15,2%                                   |
| Laser 01                                            | -1,023                               | -2,2                                 | 115,1%                                        | -1,5                                                    | 46,7%                                   |
| Laser 02                                            | -1,110                               | -2,1                                 | 89,1%                                         | -1,5                                                    | 35,1%                                   |
| Laser 03                                            | -1,468                               | -1,8                                 | 22,6%                                         | -1,3                                                    | -11,4%                                  |

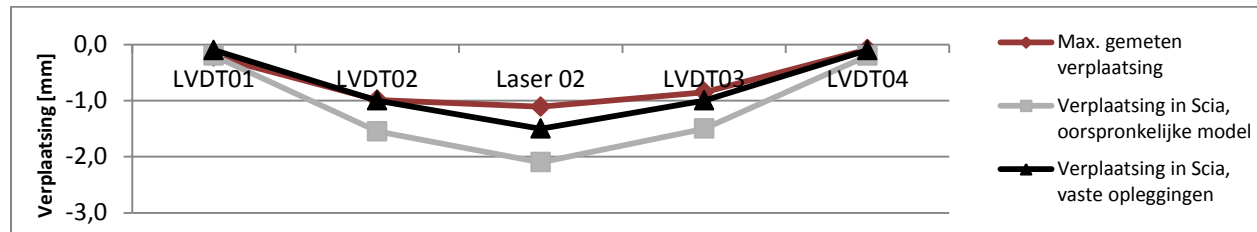
TABEL 6.2 VERGELIJKING GEMETEN VERPLAATSING MET VERPLAATSING IN MODEL; VOOR BELASTING MET 90,2 TON

| Belasting:<br>90,2 ton of<br>221,2 kN/puntlast (TS) | Max. gemeten<br>verplaatsing<br>[mm] | Verplaatsing<br>(Uz) in Scia<br>[mm] | % afwijking<br>model t.o.v.<br>gemeten waarde | Verplaatsing (Uz) in<br>Scia; vaste<br>opleggingen [mm] | % afwijking<br>t.o.v. gemeten<br>waarde |
|-----------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| LVDT01                                              | -0,297                               | -0,25                                | -15,7%                                        | -0,1                                                    | -66,3%                                  |
| LVDT02                                              | -1,331                               | -1,85                                | 38,9%                                         | -1,2                                                    | -9,9%                                   |
| LVDT03                                              | -1,143                               | -1,8                                 | 57,5%                                         | -1,15                                                   | 0,6%                                    |
| LVDT04                                              | -0,116                               | -0,2                                 | 72,7%                                         | -0,1                                                    | -13,6%                                  |
| Laser 01                                            | -1,468                               | -2,7                                 | 84,0%                                         | -1,8                                                    | 22,6%                                   |
| Laser 02                                            | -1,760                               | -2,6                                 | 47,8%                                         | -1,8                                                    | 2,3%                                    |
| Laser 03                                            | -1,821                               | -2,2                                 | 20,8%                                         | -1,5                                                    | -17,6%                                  |

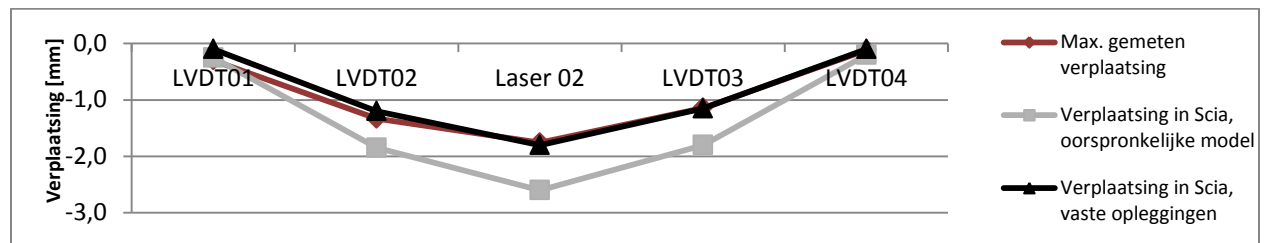
De verplaatsingen die optreden in het model met vaste opleggingen wijken een stuk minder af van de meetwaarden dan de verplaatsingen die optreden in het oorspronkelijke model. Bij belasting met 75,1 ton is de

afwijking op vier van de zeven punten minder dan 20%, bij belasting met 90,2 ton is dit zelfs op vijf van de zeven punten het geval. In het oorspronkelijke model was dit maar voor een enkel meetpunt het geval.

De grootste afwijking treedt in het model met vaste opleggingen op bij meetpunt LVDT01, daar is de afwijking bij beide belastingen meer dan 50%. De meetwaarde is echter klein bij dit meetpunt, dus absoluut gezien is dit verschil minder groot. Bij de oorspronkelijke opleggingen is dit juist het punt waar de afwijking het kleinste is; voor dit model bedraagt de afwijking op dit punt slechts 7% en 16%. Voor alle andere punten geldt dat de afwijking een stuk groter is in het oorspronkelijke model dan in het model met vaste opleggingen. In Figuur 6.2 en Figuur 6.3 is het verloop van de verplaatsing over de overspanning weergegeven voor beide modellen (zie Figuur 6.1 voor de locatie van de meetpunten). Hierin is het verschil tussen de twee modellen ook duidelijk te zien.

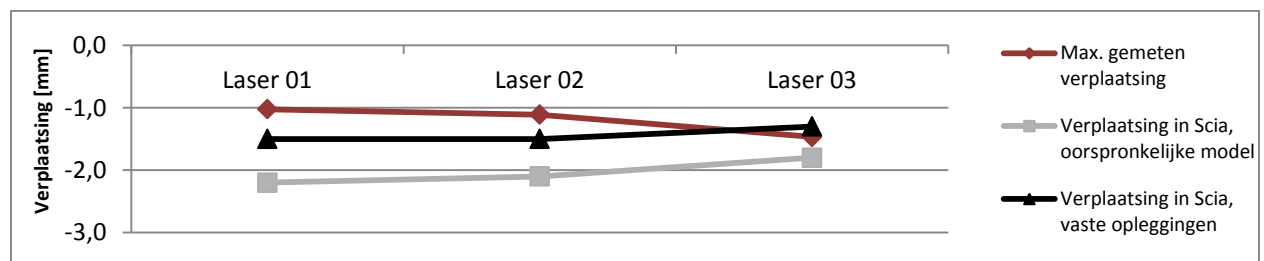


FIGUUR 6.2 VERLOOP VAN DE VERPLAATSING OVER DE OVERSPANNING VOOR BELASTING MET 75,1 TON

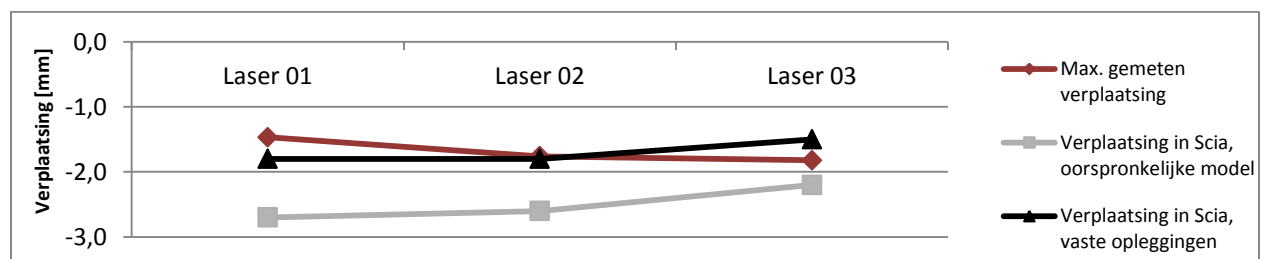


FIGUUR 6.3 VERLOOP VAN DE VERPLAATSING OVER DE OVERSPANNING VOOR BELASTING MET 90,2 TON

In Figuur 6.4 en Figuur 6.5 is het verloop van de verplaatsing weergegeven in het midden van de overspanning (Laser 01-02-03), hierin is de verplaatsing van de randstrook (Laser 01) goed te zien in vergelijking met de verplaatsingen in de plaat. Opvallend is dat de verplaatsing in de randstrook in het model groter is dan de verplaatsing in de plaat, terwijl de gemeten verplaatsing in de randstrook juist kleiner is dan de gemeten verplaatsing in de plaat.



FIGUUR 6.4 VERLOOP VAN DE VERPLAATSING IN HET MIDDE VAN DE OVERSPANNING VOOR BELASTING MET 75,1 TON



FIGUUR 6.5 VERLOOP VAN DE VERPLAATSING IN HET MIDDE VAN DE OVERSPANNING VOOR BELASTING MET 90,2 TON

### 6.3 CONCLUSIE CONTROLE MODEL IN SCIA

Het gemodelleerde brugdek, dat tijdens het onderzoek is gebruikt, blijkt behoorlijk af te wijken van de werkelijkheid; het grootste deel van de verplaatsingen wijkt met meer dan 50% af. De verplaatsingen die in het gemodelleerde brugdek ontstaan, zijn veel groter dan die het brugdek van de Halvemaansbrug. De keuze voor glijdende opleggingen in het model (opleggingen alleen vastgezet in de z-richting) lijkt hiervan de grootste oorzaak te zijn: in een brugdek met opleggingen waarin geen beweging mogelijk is in de x- en y-richting, blijken de verplaatsingen namelijk veel minder af te wijken van de werkelijke verplaatsingen.

Een andere oorzaak van de afwijkingen zou het gebruik van een verkeerde E-modulus in het model kunnen zijn. Voor een bestaande constructie is het vaak moeilijk in te schatten hoe groot de E-modulus precies is. Om verplaatsingen in het model te krijgen die die minder afwijken van de werkelijkheid, had er echter een E-modulus gebruikt moeten worden van tweemaal zo groot: dit komt neer op een E-modulus van  $2 \times 39 \text{ GPa} = 78 \text{ GPa}$ , wat niet erg realistisch is. Het gebruik van een verkeerde E-modulus lijkt dus niet de oorzaak van de afwijkingen te zijn.

De manier waarop de proefbelasting is gemodelleerd zou de afwijkingen wel deels kunnen verklaren; de proefbelasting is immers als tandemstelsel gemodelleerd, terwijl deze belasting in werkelijkheid uit twee lijnlasten bestaat. Ook kan de precieze locatie van deze lijnlasten iets verschillen van de locatie van het tandemstelsel. Erg grote gevolgen voor de verplaatsingen in het model zal dit echter niet hebben.

In het gebruikte model had dus beter voor een oplegging gekozen kunnen worden waarin geen beweging mogelijk is in de x- en y-richting, om de werkelijkheid beter te benaderen. De reden waarom er aan het begin van het onderzoek toch voor een glijdende oplegging is gekozen, is dat er bij een vaste oplegging erg grote momenten ontstaan dicht bij de opleggingen die niet realistisch zijn. Bij het vergelijken van de verplaatsingen in het brugdek, is het opvallend dat voor het meetpunt LVDT01 de afwijking juist klein is in het oorspronkelijke model (afwijking van 7%-16%), terwijl de afwijking in het model met de vaste oplegging meer dan 50% bedraagt. LVDT01 ligt vlakbij een van de opgelegde zijdes; de grote afwijking zou erop kunnen duiden dat de situatie dicht bij de opleggingen bij een vaste oplegging niet realistisch is. De afwijking bij LVDT04, het meetpunt dicht bij de andere opgelegde zijde, is echter wel klein in het model met vaste opleggingen. Blijkbaar is voor deze kant van het brugdek een vaste oplegging wel realistisch. Het opleggen van het brugdek met opleggingen die vaststaan in x- en y-richting lijkt voor het grootste deel van de brug dus wel realistisch, maar geeft aan de zijde van LVDT01 nog problemen. Om dit nader te onderzoeken, zou er bijvoorbeeld gekeken kunnen worden naar een brugdek dat aan elke zijde op een verschillende manier is opgelegd.

## 7 CONCLUSIE & AANBEVELINGEN

In dit hoofdstuk worden de doelstellingen van dit onderzoek beantwoord. Bij elke conclusie worden er aanbevelingen gedaan; concrete adviezen die in de praktijk gebruikt kunnen worden als er sprake is van een scheefstaand brugdek met randstroken.

Als eerste doel is bepaald welke parameter de momentenverdeling in een recht brugdek met randstroken het meeste beïnvloedt; dit blijkt de dikte van de randstroken te zijn. Voor een recht brugdek, belast met de verkeersbelasting volgens NEN-EN 1991-2, geldt het volgende bij het verhogen van de randstroken met een bepaald percentage<sup>1</sup>.

- Het maximale moment in de randstrook neemt met ongeveer het dubbele van de procentuele toename van de dikte van de rand toe.
- De verandering van het maximale moment in de plaat is driemaal zo klein als de verandering van het maximale moment in de randstrook.

Het maximale moment in de randstrook van de Halvemaansbrug is maar liefst 60% groter dan het maximale moment in een brugdek zonder randstroken. De dikte van de randstroken moet dus altijd meegenomen worden in een berekening of een modellering van een brugdek. Dit kan tot een dikte van 590 mm ook worden gedaan door het brugdek te modelleren als een vlakke plaat met hierin randstroken met een verhoogde E-modulus, waardoor de randstroken eenzelfde stijfheid hebben als verhoogde randstroken. Dit leidt tot een afwijking in grootte van momenten van slechts 1%.

Het effect van een kleine afwijking van 10 mm van de dikte van de randstrook op de momentenverdeling is verwaarloosbaar. Dit geldt voor zowel een recht als een scheefstaand brugdek, en voor alle belastingsgevallen die onderzocht zijn. Het maximale moment in de randstrook wijkt bij een dergelijke afwijking met maximaal 2,8% af.

Als tweede doel is onderzocht hoe groot de invloed is van scheefstand van het brugdek op de optredende momenten. Hieruit kan worden bepaald in welke gevallen scheefstand te verwaarlozen is.

- Voor een vlakke plaat zonder randstroken kan scheefstand verwaarloosd worden; de momenten die hierin optreden verschillen maximaal 5,4% van momenten in een recht brugdek. Dit geldt voor alle onderzochte belastingsgevallen.
- Bij belasting met uitsluitend eigen gewicht kan scheefstand ook bij randstroken van 590 mm verwaarloosd worden: het verschil in momenten tussen een recht en scheefstaand brugdek bedraagt dan maximaal 5,3%.
- Bij belasting met de normbelasting wordt, naarmate de dikte van de randstroken toeneemt, de invloed van scheefstand groter. Momenten in het brugdek van de Halvemaanbrug, met randstroken van 590 mm dik, verschillen maximaal 8,4% van momenten in een rechte brug. Bij belasting met uitsluitend tandemstelsel 1 bedraagt dit verschil zelfs 12%. Bij deze belastingen speelt scheefstand dus wel een significante rol.

De invloed van de dikte van de randstroken is echter wel vele malen groter dan de invloed van scheefstand: randstroken van 590 mm dik zorgen voor een toename van 60% van het maximale moment vergeleken met een vlakke plaat. Scheefstand kan dus veel eerder verwaarloosd worden dan de dikte van de randstroken.

Als derde doel is onderzocht hoe groot het verschil is tussen het effect van de proefbelasting, gebruikt bij het beproeven van de Halvemaansbrug, en van de voorgeschreven verkeersbelasting volgens NEN-EN 1991-2 op de momentenverdeling in het brugdek. Wat betreft de locatie van het maximale moment in de randstroken, benadert de proefbelasting de normbelasting goed: bij beide belastingen treedt dit moment op dezelfde locatie op. Dit is niet het geval voor het maximale moment in de plaat, dit moment treedt voor beide belastingen op verschillende plaatsen op. Het verschil tussen de grootte van de momenten die optreden ten gevolge van de norm- en proefbelasting is afhankelijk van welke belastingsfactoren en eventuele reductiefactor er wordt gebruikt voor de normbelasting. De grootte van dit verschil moet dus per situatie worden bepaald.

---

<sup>1</sup> Dit geldt in principe voor een brugdek met de geometrie van de Halvemaansbrug; met randstroken van 1 m breed en een wegdek van 5,5 m breed.

## 8 DISCUSSIE

Het model dat is gebruikt voor de parameterstudies bleek niet volledig overeen te komen met het werkelijke brugdek van de Halvemaansbrug<sup>1</sup>. Achteraf gezien had de plaat in het model beter op een andere manier opgelegd kunnen worden, zodat het gedrag van de plaat bij belasting meer overeenkomt met de werkelijkheid. Een goede manier om de opleggingen van de plaat te modelleren zonder dat er bijzonder grote, onrealistische momenten optreden, is er echter nog niet. Hier zou in een vervolgonderzoek verder naar gekeken kunnen worden.

Een parameter die ook invloed kan hebben op de krachtsverdeling in het brugdek van de Halvemaansbrug maar niet onderzocht is, is de mate van scheefstand van de brug. Bij dit onderzoek is alleen gekeken naar de werkelijke scheefstand van de Halvemaansbrug in vergelijking met een recht brugdek. In een vervolgonderzoek zou hier dieper op in kunnen worden gegaan, om een nog vollediger beeld te krijgen van factoren die invloed hebben op de krachtsverdeling in een brugdek met randstroken. Uit dit onderzoek bleek echter wel dat scheefstand van het brugdek een stuk minder invloed heeft op de grootte van de optredende momenten dan de dikte van randstroken.

Daarnaast zou ook gekeken kunnen worden naar de invloed van de lengte van de overspanning op de momentenverdeling in het brugdek. Voor een vlakke plaat geldt dat het maximale moment dat in de plaat ontstaat, toeneemt als de lengte van de overspanning in het model ook groter wordt:  $M_{\max} = \frac{1}{8} \cdot q \cdot l^2$  (bij een verdeelde belasting over de hele plaat, zoals eigen gewicht). Of dit ook geldt voor een brugdek met versterkte randstroken dat scheef staat, is echter niet bekend. De invloed van de overspanningslengte op de momenten in een scheefstaand brugdek met versterkte randstroken zou in een vervolgonderzoek onderzocht kunnen worden.

Ten slotte is wegens de relatief korte duur van dit onderzoek alleen gekeken naar de optredende momenten in het brugdek. Versterkte randstroken en scheefstand van het brugdek hebben echter ook invloed op andere grootheden, zoals de optredende dwarskrachten en spanningen in het brugdek. Wellicht worden deze grootheden door een andere parameter dan de dikte van de randstroken bijzonder veel beïnvloed, en zijn andere parameters bij berekening van deze grootheden verwaarloosbaar.

---

<sup>1</sup> Zie hoofdstuk 6.

## LITERATUURLIJST

- Van Engelen, L. (2011, 12 januari). Herenweg houdt beweegbare paal, *Noordhollands Dagblad*. Bezocht op 10 september, 2014, van <http://www.noordhollandsdagblad.nl/stadstreek/alkmaar/article5847521.ece>
- Fennis, S.A.A.M. (2014). *Meetprotocol TU Delft voor proefbelasten Halvemaansbrug*.
- Nemetschek Scia. (n.d.). Overview of the types of co-ordinate systems in Scia Engineer. Bezocht op 8 september, 2014, van <http://nemetschek-Scia.com/en/support/faq/tips-and-tricks/overview-types-co-ordinate-systems-Scia-engineer>
- Nemetschek Scia. (n.d.). How are internal forces and stresses of 2D elements considered and calculated in Scia Engineer?. Bezocht op 8 september, 2014, van <http://nemetschek-Scia.com/en/support/faq/tips-and-tricks/how-are-internal-forces-and-stresses-2d-elements-considered-and>
- NEN-EN 1991-2+C1:2011. (2011). Eurocode 1: Belastingen op constructies – Deel 2: Verkeersbelasting op bruggen NEN.
- NEN-EN 1992-1-1+C2 (2011). Eurocode 2: Ontwerp en berekening van betonconstructies - Deel 1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen NEN.
- Rijkswaterstaat (2013). Richtlijnen Beoordeling Kunstwerken 1.1. Rijkswaterstaat.
- Walraven, J.C., Fennis, S.A.A.M. (2013). *Dictaat CT2052/3150 Gewapend Beton*. Delft: TU Delft.

## FIGUREN

**Figuur 1.1:** *Bovenaanzicht van de Halvemaansbrug*. Bron: Google Maps

**Figuur 2.10:** *Geconcentreerde dubbele aslasten*. Bron: NEN-EN 1991-2+C1:2011. (2011). Eurocode 1: Belastingen op constructies – Deel 2: Verkeersbelasting op bruggen NEN.

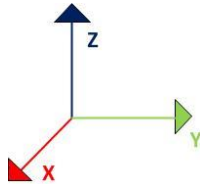
**Figuur A.2** (Bijlage): *Buigende momenten in Scia*. Bron: Nemetschek Scia. (n.d.). How are internal forces and stresses of 2D elements considered and calculated in Scia Engineer?. Bezocht op 8 september, 2014, van <http://nemetschek-Scia.com/en/support/faq/tips-and-tricks/how-are-internal-forces-and-stresses-2d-elements-considered-and>



## Bijlage A Doorsnedekrachten en spanningen in een plaat

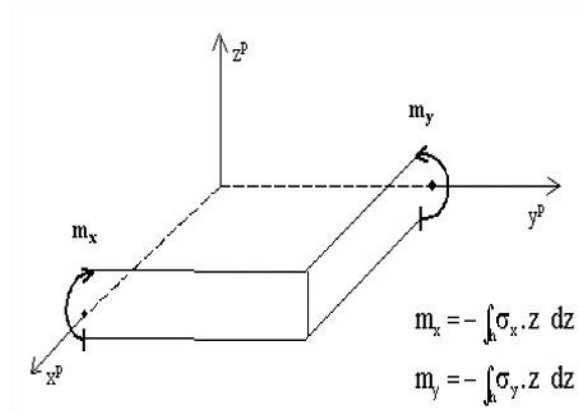
### Definities van momenten in een doorsnede

In Scia Engineer wordt het volgende globale assenstelsel aangehouden, met deze vaste kleuren<sup>1</sup>:



FIGUUR A.1: GLOBAAL ASSENSTELSEL IN SCIA

Op de site van Scia Engineer<sup>2</sup> is beschreven hoe doorsnedekrachten aangenomen zijn. Buigende momenten in de x- en y-richting zijn als volgt gedefinieerd in Scia, en positief aangenomen in de volgende richtingen:



FIGUUR A.2 BUIGENDE MOMENTEN IN SCIA. BRON: WEBSITE SCIA ENGINEER<sup>2</sup>.

$m_x$  is dus het moment in het x-z-vlak, om de y-as, per eenheid van breedte (kNm/m). Dit moment wordt als positief gezien als dit moment trekspanningen veroorzaakt aan de onderkant van de plaat.  $m_y$  is het moment per eenheid van breedte in het y-z-vlak, om de x-as, en is ook positief bij trekspanningen aan de onderkant van de plaat.

Bij het tonen van momenten als oplegreactie in plaats van als doorsnedekracht, wordt in Scia echter aangehouden dat  $M_x$  het moment is *om* de x-as,  $M_y$  *om* de y-as en  $M_z$  om de z-as. Deze resulterende momenten in de opleggingen worden in het model met pijlen aangegeven.

### Algemene berekening van spanningen in een doorsnede

De grootte van de spanning als gevolg van de normaalkracht in x-richting wordt als volgt berekend:

$$\sigma_x = \frac{N_x}{b \cdot h}$$

Hierbij is de spanning positief als de normaalkracht,  $N$ , ook positief is, dus wanneer er sprake is van een trekspanning.

<sup>1</sup> Nemetschek Scia. (n.d.). Overview of the types of co-ordinate systems in Scia Engineer. Bezocht op 8 september, 2014, van <http://nemetschek-Scia.com/en/support/faq/tips-and-tricks/overview-types-co-ordinate-systems-Scia-engineer>

<sup>2</sup> Nemetschek Scia. (n.d.). How are internal forces and stresses of 2D elements considered and calculated in Scia Engineer?. Bezocht op 8 september, 2014, van <http://nemetschek-Scia.com/en/support/faq/tips-and-tricks/how-are-internal-forces-and-stresses-2d-elements-considered-and>

De grootte van de spanning in de doorsnede als gevolg van een buigend moment om de y-as ( $M_x$ ) wordt berekend met:

$$\sigma_x = \frac{M_x \cdot z}{I_y}$$

Hierin staat  $I_y$  voor het traagheidsmoment voor buiging om de y-as; dit is definitie die hiervoor in Scia gebruikt wordt (in plaats van  $I_{zz}$ ).  $z$  is de afstand tussen de z-coördinaat van het zwaartepunt en de z-coördinaat van het punt waarop de spanning wordt berekend.

In een rechthoekige doorsnede kunnen de uiterste spanningen aan de onder- en bovenkant van de plaat ook worden geschreven als:

$$\sigma = \frac{M}{W} \quad \text{of} \quad \sigma = \frac{6 \cdot M}{b \cdot h^2} \quad \text{met } W = \text{weerstandsmoment: } W = 1/6 bh^2$$

### Spanningen in Scia

Op de website van Scia<sup>1</sup> wordt aangegeven hoe spanningen in een rechthoekige doorsnede worden genoteerd en berekend. De berekening wordt gedaan op eenzelfde manier als hierboven is beschreven, in plaats van de grootheden  $M$  en  $N$  worden echter de momenten en normaalkrachten per eenheid van breedte gebruikt;  $m$  en  $n$ . Er wordt dus niet meer door de breedte gedeeld. Onderstaande tabel geeft een overzicht van de notatie en de wijze van berekening van enkele grootheden.

TABEL A.1 OVERZICHT NOTATIE EN WIJZE VAN BEREKENEN VAN ENKELE NORMAAL- EN SCHUIFSPANNINGEN

| Notatie | Beschrijving                                                                                                             | Berekening                                      |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| sigx+   | (normaal)spanning in x-richting ( $\sigma_x$ ), op het positieve vlak                                                    | $\frac{n_x}{h} + \frac{6 \cdot m_x}{h^2}$       |
| sigx-   | (normaal)spanning in x-richting, op het negatieve vlak                                                                   | $\frac{n_x}{h} - \frac{6 \cdot m_x}{h^2}$       |
| sigxy+  | (schuif)spanning ( $\tau_{xy}$ ) als gevolg van schuifkracht en torsiemoment in x- en y-richting, op het positieve vlak. | $\frac{n_{xy}}{h} + \frac{6 \cdot m_{xy}}{h^2}$ |
| sigxy-  | idem, op het negatieve vlak                                                                                              |                                                 |

Onderstaande tabel geeft een beknopt overzicht van alle doorsnedekrachten met hun betekenis.

TABEL A.2 OVERZICHT DOORSNEDEKRACHTEN MET BETEKENIS

| Notatie doorsnedekracht | Betekenis                                                                              |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| mx                      | Moment om y-as heen [kNm/m], positief bij trek aan onderzijde                          |
| my                      | Moment om x-as heen [kNm/m]                                                            |
| mxy                     | Torsiemoment in x-z en y-z vlak [kNm/m]                                                |
| vx                      | Dwarskracht in het y-z-vlak [kN/m], positief als naar beneden gericht op positief vlak |
| vy                      | Dwarskracht in het x-z-vlak [kN/m]                                                     |
| nx                      | Normaalkracht in x-richting [kN/m], positief bij trekspanningen                        |
| ny                      | Normaalkracht in y-richting [kN/m]                                                     |

mx, het moment om de y-as, is het moment dat tijdens het onderzoek telkens wordt beschouwd.

<sup>1</sup>Ibid.

## Bijlage B Belasting

### B.1 CONTROLE EIGENGEWICHT MODEL MET HANDBEREKENING

Om te controleren of het eigen gewicht van de plaat op een juiste manier is gemodelleerd in Scia, is er met een handberekening onderzocht welke waarde het maximale moment in de plaat zou moeten hebben. Het eigen gewicht van de plaat die in Scia is gemodelleerd bedraagt  $25 \text{ kN/m}^3$ , dit is de standaardwaarde voor beton die in Scia wordt gebruikt. Voor de gemodelleerde plaat, die een dikte heeft van  $450 \text{ mm}$ , komt dit overeen met een verdeelde belasting van  $25 \times 0,450 = 11,25 \text{ kN/m}^2$ .

Aangezien de plaat in één richting is opgelegd, kan het maximale moment in de plaat ten gevolge van een verdeelde belasting die over de gehele plaat werkt, bepaald worden met de volgende formule<sup>1</sup>:

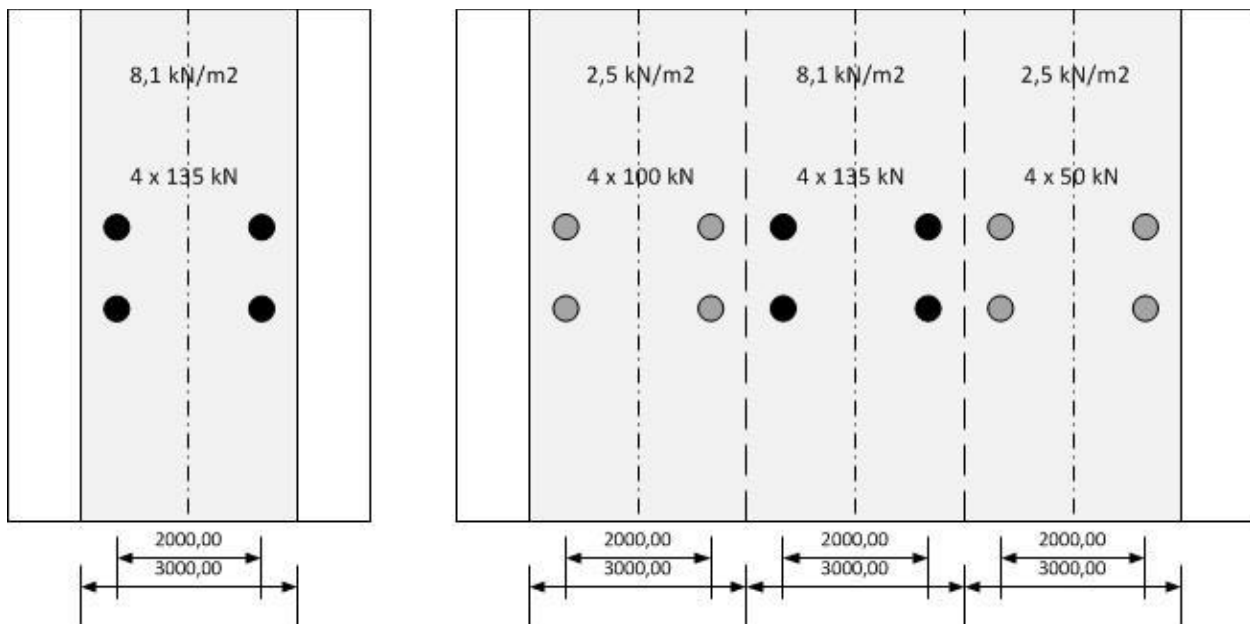
$$M_{max} = \frac{1}{8} \cdot q \cdot l^2$$

Hieruit volgt het maximale moment per eenheid van breedte, dus in  $\text{kNm/m}$ . Dit is ook de eenheid die in Scia wordt gebruikt. De gemodelleerde plaat heeft een overspanning van  $7,06 \text{ m}$ . Hieruit volgt dat het maximale moment dat in de plaat optreedt ten gevolge van het eigen gewicht de volgende waarde heeft:

$$M_{max} = \frac{1}{8} \cdot 11,25 \cdot 7,06^2 = 70,09 \text{ kNm/m}$$

Het maximale moment dat in de gemodelleerde plaat optreedt ten gevolge van uitsluitend het eigen gewicht, bedraagt  $70,93 \text{ kNm/m}$  volgens de berekening in Scia. Dit resultaat komt vrijwel overeen met de berekende waarde, er kan dus aangenomen worden dat het eigen gewicht op een juiste manier is gemodelleerd.

### B.2 BELASTING OP MODELLEN M2P EN M3P, VARIABEL AANTAL RIJSTROKEN



FIGUUR B.1 BELASTING OP BRUGDEK MET 1 EN 3 RIJSTROKEN (AFMETINGEN IN MM)

<sup>1</sup> Walraven, J.C., Fennis, S.A.A.M. (2013). *Dictaat CT2052/3150 Gewapend Beton*. Delft: TU Delft.

## Bijlage C Resultaten parameterstudie recht brugdek

### C.1 VARIATIE D\_RAND; MOMENTENLIJNEN, TABEL

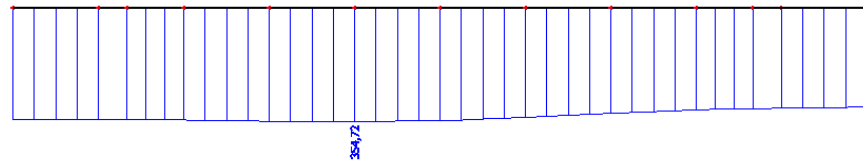
d\_rand = variabeel

b\_plaat = 5,5 m

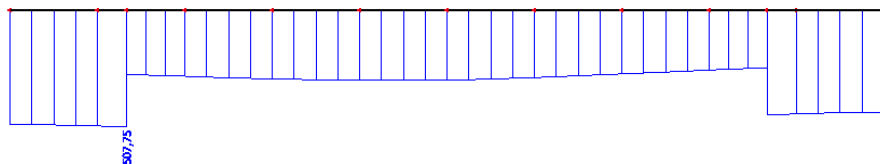
b\_rand = 1 m

E = 39 GPa

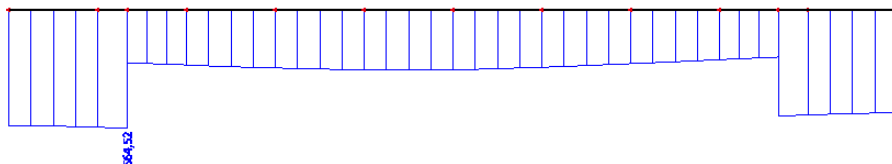
**Belasting met normbelasting; bestaande uit verdeelde belasting, tandemstelsels en eigen gewicht**



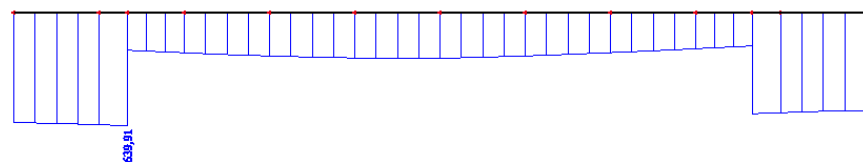
FIGUUR C.1 MOMENTENLIJN IN DOORSNEDE 1 TEN GEVOLGE VAN DE NORMBELASTING, BIJ D\_RAND = 450 MM. MAX. MOMENT RAND = 349,52 KNM/M, MAX. MOMENT PLAAT = 354,72 KNM/M



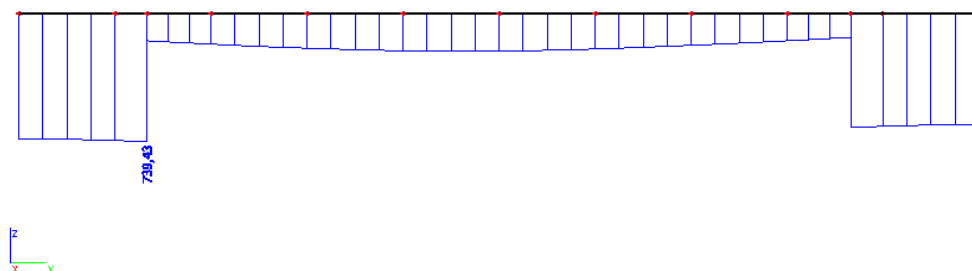
FIGUUR C.2 MOMENTENLIJN IN DOORSNEDE 1 TEN GEVOLGE VAN DE NORMBELASTING, BIJ D\_RAND = 550 MM. MAX. MOMENT RAND = 507,75 KNM/M, MAX. MOMENT PLAAT = 306,28 KNM/M



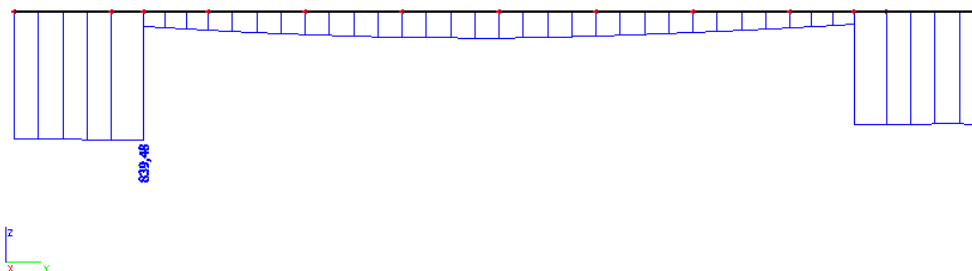
FIGUUR C.3 MOMENTENLIJN IN DOORSNEDE 1 TEN GEVOLGE VAN DE NORMBELASTING, BIJ D\_RAND = 590 MM. MAX. MOMENT RAND = 564,52 KNM/M, MAX. MOMENT PLAAT = 287 KNM/M



FIGUUR C.4 MOMENTENLIJN IN DOORSNEDE 1 TEN GEVOLGE VAN DE NORMBELASTING, BIJ D\_RAND = 650 MM. MAX. MOMENT RAND = 639,91 KNM/M, MAX. MOMENT PLAAT = 259,94 KNM/M



FIGUUR C.5 MOMENTENLIJN IN DOORSNEDE 1 TEN GEVOLGE VAN DE NORMBELASTING, BIJ  $D_{\text{RAND}} = 750 \text{ mm}$ . MAX. MOMENT RAND = 739,43 KNM/M, MAX. MOMENT PLAAT = 219,66 KNM/M



FIGUUR C.6 MOMENTENLIJN IN DOORSNEDE 1 TEN GEVOLGE VAN DE NORMBELASTING, BIJ  $D_{\text{RAND}} = 900 \text{ mm}$ . MAX. MOMENT RAND = 839,48 KNM/M, MAX. MOMENT PLAAT = 175,39 KNM/M

TABEL C.1 RESULTATEN VARIATIE  $D_{\text{RAND}}$  T.O.V. EEN ANDER REFERENTIEMODEL (ZIE ONDER TABEL), BELAST MET NORMBELASTING + E.G.

| $d_{\text{rand}}$ (mm)                 | 590    | 550     | 650    | 750     | 900     |
|----------------------------------------|--------|---------|--------|---------|---------|
| Mplaat [kNm/m]                         | 286,99 | 306,28  | 259,44 | 219,66  | 175,59  |
| Mrand [kNm/m]                          | 564,52 | 507,75  | 639,91 | 739,43  | 839,48  |
| Verhouding Mrand/Mplaat                | 1,97   | 1,66    | 2,47   | 3,37    | 4,78    |
| % verandering Mplaat t.o.v. referentie |        | 6,72%   | -9,60% | -23,46% | -38,82% |
| % verandering Mrand t.o.v. referentie  |        | -10,06% | 13,35% | 30,98%  | 48,71%  |

Referentiemodel:

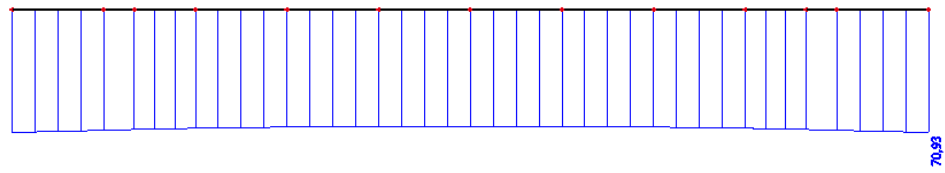
$d_{\text{rand}} = 590 \text{ mm}$

$b_{\text{rand}} = 1 \text{ m}$

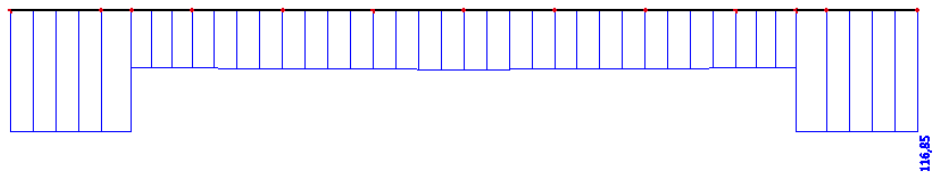
$b_{\text{plaat}} = 5,5 \text{ m}$

$E = 39 \text{ GPa}$

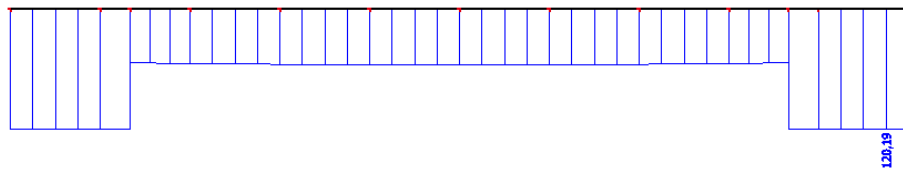
## Belasting met uitsluitend eigen gewicht



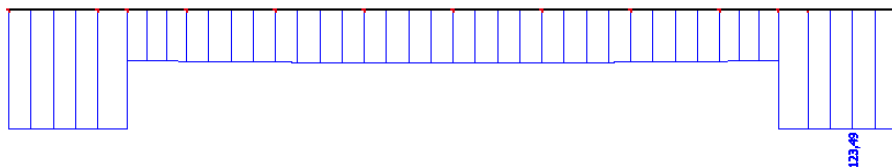
FIGUUR C.7 MOMENTENLIJN IN DOORSNEDE 1 TEN GEVOLGE VAN EIGEN GEWICHT, BIJ D\_RAND = 450 MM. MAX. MOMENT RAND = 70,93 KNM/M, MAX. MOMENT PLAAT = 69,42 KNM/M



FIGUUR C.8 MOMENTENLIJN IN DOORSNEDE 1 TEN GEVOLGE VAN EIGEN GEWICHT, BIJ D\_RAND = 580 MM. MAX. MOMENT RAND = 116,85 KNM/M, MAX. MOMENT PLAAT = 56,91 KNM/M



FIGUUR C.9 MOMENTENLIJN IN DOORSNEDE 1 TEN GEVOLGE VAN EIGEN GEWICHT, BIJ D\_RAND = 590 MM. MAX. MOMENT RAND = 120,19 KNM/M, MAX. MOMENT PLAAT = 56,01 KNM/M



FIGUUR C.10 MOMENTENLIJN IN DOORSNEDE 1 TEN GEVOLGE VAN EIGEN GEWICHT, BIJ D\_RAND = 600 MM. MAX. MOMENT RAND = 123,49 KNM/M, MAX. MOMENT PLAAT = 55,12 KNM/M

## C.2 VARIATIE E-MODULUS

### Berekening E-moduli die leiden tot eenzelfde EI als variatie van afmetingen randstroken

Het variëren van h, en daarmee I, bij een constante E, kan in eenzelfde EI resulteren als het variëren van de E-modulus bij een constante h (en I). De waarden voor E die leiden tot eenzelfde EI als de verschillende diktes van de randstroken, zijn met behulp van onderstaande tabel berekend. Hierin is de volgende formule gebruikt voor het berekenen van het traagheidsmoment I:

$$\frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3$$

waarin b = breedte van de randstrook, h=dikte randstrook. Met behulp van een bekende h en b zijn I en EI berekend, vervolgens is deze I constant aangenomen en is berekend welke waarde voor E tot eenzelfde EI leidt. Deze waarden voor E zijn vervolgens gebruikt in de verschillende modellen.

TABEL C.2 BEREKENING E-MODULI DIE OVEREENKOMEN MET BEPAALDE DIKTES VAN RANDSTROKEN

| Variërend: h, I   Constant: E = 39 GPa, b=1m |         |                     |                        | Variërend: E   Constant: I, h=450 mm, b=1m |                     |
|----------------------------------------------|---------|---------------------|------------------------|--------------------------------------------|---------------------|
| h [mm]                                       | E [GPa] | I [m <sup>4</sup> ] | EI [GNm <sup>2</sup> ] | E [GPa]                                    | I [m <sup>4</sup> ] |
| 450                                          | 39      | 0,00759             | 0,296                  | <b>39,0</b>                                | 0,00759             |
| 550                                          | 39      | 0,01386             | 0,542                  | <b>71,4</b>                                | 0,00759             |
| 590                                          | 39      | 0,01711             | 0,669                  | <b>88,1</b>                                | 0,00759             |
| 650                                          | 39      | 0,02289             | 0,895                  | <b>117,8</b>                               | 0,00759             |
| 750                                          | 39      | 0,03516             | 1,371                  | <b>180,6</b>                               | 0,00759             |
| 900                                          | 39      | 0,06075             | 2,369                  | <b>312,0</b>                               | 0,00759             |

Ook voor een variërende b\_rand is berekend welke waarden voor E hiermee overeen komen. Deze berekening is te zien in onderstaande tabel.

TABEL C.3 BEREKENING E-MODULI DIE OVEREENKOMEN MET BEPAALDE BREEDTES VAN RANDSTROKEN

| Variërend: b, I   Constant: E = 39 GPa, h=590m |         |                     |                        | Variërend: E   Constant: I, b=1m, h=590 mm |                     |
|------------------------------------------------|---------|---------------------|------------------------|--------------------------------------------|---------------------|
| b [m]                                          | E [GPa] | I [m <sup>4</sup> ] | EI [GNm <sup>2</sup> ] | E [GPa]                                    | I [m <sup>4</sup> ] |
| <b>1</b>                                       | 39      | 0,01711             | 0,66748                | <b>39,00</b>                               | 0,01711             |
| <b>1,5</b>                                     | 39      | 0,02567             | 1,00122                | <b>58,50</b>                               | 0,01711             |
| <b>0,5</b>                                     | 39      | 0,00856             | 0,33374                | <b>19,50</b>                               | 0,01711             |

## Tabellen van resultaten

TABEL C.4 VERGELIJKING VAN MOMENTEN BIJ VARIATIE E-MODULUS MET MOMENTEN IN GECENTREERDE EN EXCENTRISCHE RANDSTROKEN BIJ VARIËRENDE D\_RANDOM, BELASTING MET NORMBELASTING EN E.G.

| E [GPa]                                  | 39     | 71,4   | 117,8  | 180,6  | 312,0   |
|------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|---------|
| Komt overeen met dikte:                  | 450    | 550    | 650    | 750    | 900     |
| Mplaat-d [kNm/m]                         | 354,72 | 306,28 | 259,44 | 219,7  | 175,59  |
| Mplaat-midden [kNm/m]                    |        | 309,7  | 268,31 | 232,4  | 190,04  |
| Mplaat-E [kNm/m]                         |        | 306,15 | 262,40 | 224,6  | 179,27  |
| % verschil Mplaat-d t.o.v. Mplaat-E      |        | 0,04%  | -1,13% | -2,18% | -2,05%  |
| % verschil Mplaat-midden t.o.v. Mplaat-E |        | 1,08%  | 2,16%  | 3,49%  | 6,01%   |
| Mrand-d [kNm/m]                          | 349,52 | 507,75 | 639,91 | 739,43 | 839,48  |
| Mrand-midden [kNm/m]                     |        | 515,65 | 673,97 | 813,09 | 979,32  |
| Mrand-E [kNm/m]                          |        | 507,69 | 656,98 | 786,08 | 941,72  |
| % verschil Mrand-d t.o.v. Mrand-E        |        | -0,15% | -2,60% | -5,93% | -10,86% |
| % verschil Mrand-midden t.o.v. Mrand-E   |        | 1,57%  | 2,71%  | 3,44%  | 3,99%   |

TABEL C.5 VERGELIJKING MOMENTEN BIJ VARIATIE IN KLEINERE E-MODULI EN DIKTES, BIJ BELASTING MET NORMBELASTING EN E.G.

| E-modulus [GPa]                     | 39     | 40,7   | 42,2   | 43,6   |
|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Komt overeen met dikte [mm]         | 450    | 456,1  | 461,6  | 466,6  |
| Mplaat-E [kNm/m]                    | 354,72 | 351,78 | 349,08 | 346,61 |
| Mplaat-d [kNm/m]                    | 354,72 | 351,99 | 349,49 | 347,19 |
| % verschil Mplaat-E t.o.v. Mplaat-d |        | 0,06%  | 0,12%  | 0,17%  |
| Mrand-E [kNm/m]                     | 349,52 | 359,15 | 367,97 | 376,03 |
| Mrand-d [kNm/m]                     | 349,52 | 359,52 | 368,52 | 376,69 |
| % verschil Mrand-E t.o.v. Mrand-d   |        | 0,10%  | 0,15%  | 0,18%  |

TABEL C.6 RESULTATEN VARIATIE E-MODULUS VERGELEKEN MET VARIATIE B\_RANDOM, BELASTING MET NORMBELASTING EN E.G.

| E [GPa]                                   | 39     | 58,5   | 19,5    |
|-------------------------------------------|--------|--------|---------|
| Komt overeen met breedte [m]:             | 1,0    | 1,5    | 0,5     |
| Mplaat [kNm/m]                            | 286,99 | 263,07 | 331,02  |
| Mplaat-E [kNm/m]                          |        | 251,98 | 345,00  |
| % verschil Mplaat-E t.o.v. Mplaat         |        | -4,22% | 4,22%   |
| Mrand [kNm/m]                             | 564,52 | 482,71 | 717,77  |
| Mrand-E [kNm/m]                           |        | 684,38 | 375,84  |
| Mrand [kNm]                               |        | 724,07 | 358,89  |
| Mrand-E [kNm]                             |        | 684,38 | 375,84  |
| % verschil Mrand-E t.o.v. Mrand           |        | 41,78% | -47,64% |
| % verschil Mrand-E t.o.v. Mrand, in [kNm] |        | -5,5%  | 4,7%    |



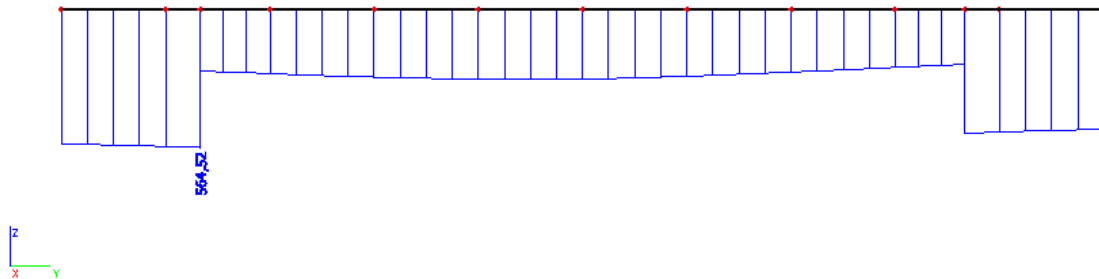
### C.3 MOMENTENLIJNEN VARIATIE B RAND

$d_{\text{rand}} = 590 \text{ mm}$

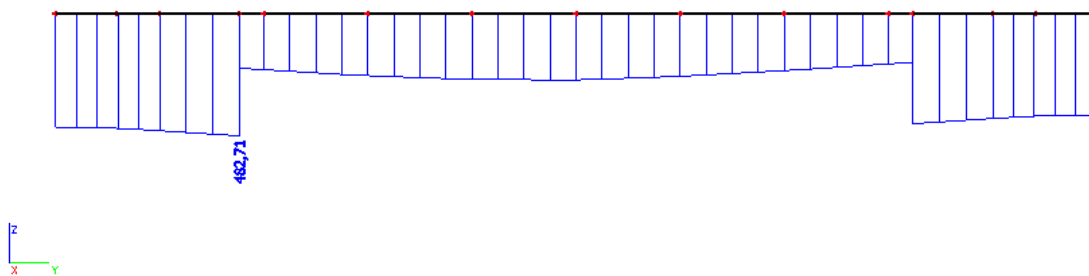
$b_{\text{plaat}} = 5,5 \text{ m}$

$E = 39 \text{ GPa}$

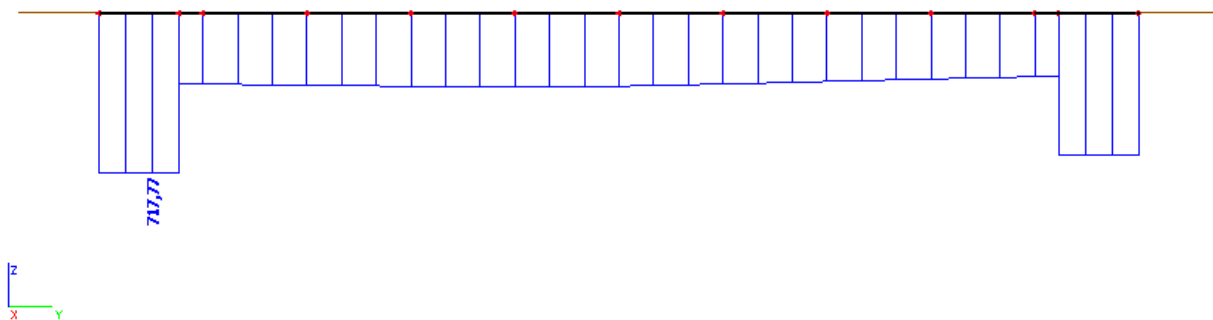
$b_{\text{rand}} = \text{variabel}$



FIGUUR C.11 MOMENTENLIJN IN DOORSNEDE 1 TEN GEVOLGE VAN DE NORMBELASTING, BIJ  $b_{\text{rand}} = 1 \text{ m}$ . MAX MOMENT RAND = 564,5 KNM/M, MAX MOMENT PLAAT = 287,0 KNM/M



FIGUUR C.12 MOMENTENLIJN IN DOORSNEDE 1 TEN GEVOLGE VAN DE NORMBELASTING, BIJ  $b_{\text{rand}} = 1,5 \text{ m}$ . MAX MOMENT RAND = 482,7 KNM/M, MAX MOMENT PLAAT = 263,07 KNM/M



FIGUUR C.13 MOMENTENLIJN IN DOORSNEDE 1 TEN GEVOLGE VAN DE NORMBELASTING, BIJ  $b_{\text{rand}} = 0,5 \text{ m}$ . MAX MOMENT RAND = 717,77 KNM/M, MAX MOMENT PLAAT = 331,02 KNM/M

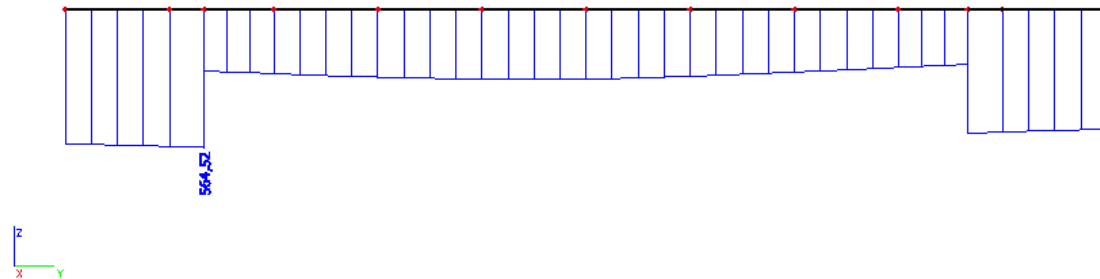
## C.4 MOMENTENLIJNEN VARIATIE B\_PLAAT

$d_{\text{rand}} = 590 \text{ mm}$

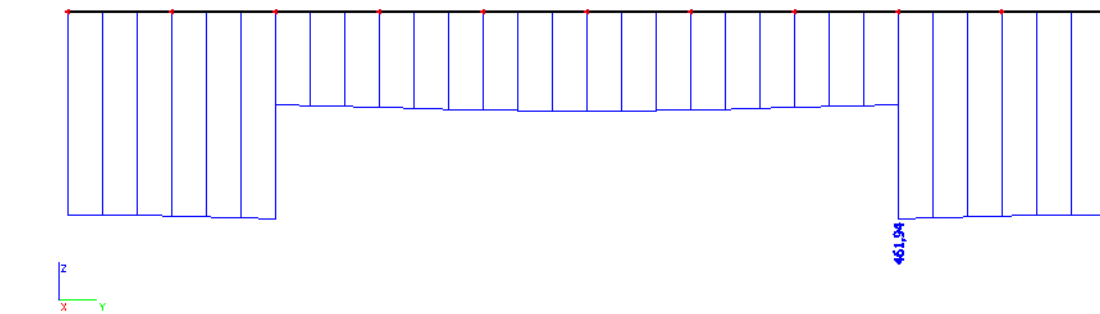
$b_{\text{rand}} = 1,0 \text{ m}$

$E = 39 \text{ GPa}$

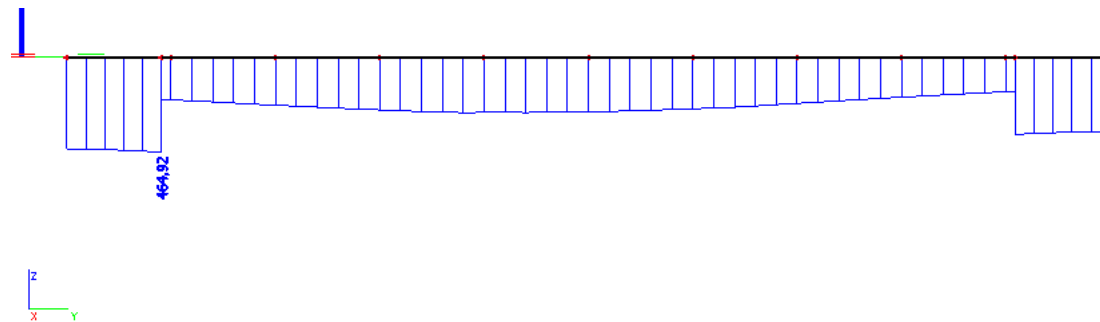
$b_{\text{plaat}} = \text{variabel}$



FIGUUR C.14 MOMENTENLIJN IN DOORSNEDE 1 TEN GEVOLGE VAN DE NORMBELASTING, BIJ  $B_{\text{PLAAT}} = 5,5 \text{ M}$ . MAX MOMENT RAND = 564,5 KNM/M, MAX MOMENT PLAAT = 287,0 KNM/M



FIGUUR C.15 MOMENTENLIJN IN DOORSNEDE 1 TEN GEVOLGE VAN DE NORMBELASTING, BIJ  $B_{\text{PLAAT}} = 3,0 \text{ M}$ . MAX MOMENT RAND = 461,9 KNM/M, MAX MOMENT PLAAT = 221,5 KNM/M

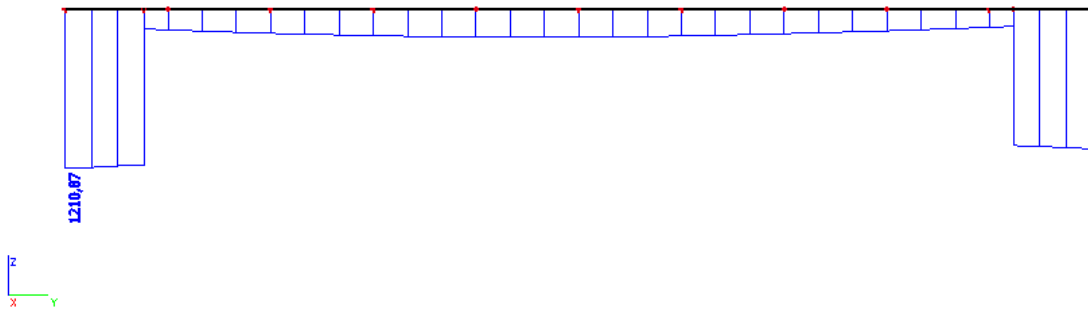


FIGUUR C.16 MOMENTENLIJN IN DOORSNEDE 1 TEN GEVOLGE VAN DE NORMBELASTING, BIJ  $B_{\text{PLAAT}} = 9,0 \text{ M}$ . MAX MOMENT RAND = 464,9 KNM/M, MAX MOMENT PLAAT = 271,9 KNM/M

## C.5 COMBINATIE PARAMETERS; MOMENTENLIJNEN, TABELLEN

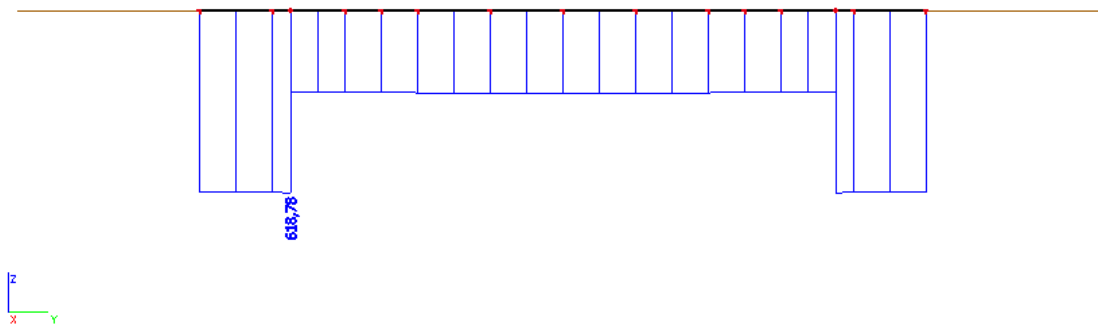
### Momentenlijnen combinaties

Combinatie 1:  $d_{\text{rand}} = 900 \text{ mm}$     $b_{\text{rand}} = 0,5 \text{ m}$     $b_{\text{plaat}} = 5,5 \text{ m}$



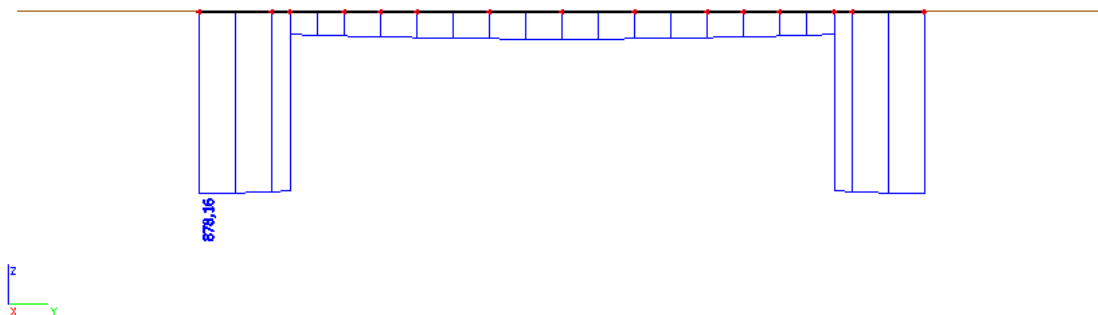
FIGUUR C.17 MOMENTENLIJN IN DOORSNEDE 1 TEN GEVOLGE VAN DE NORMBELASTING. MAX MOMENT RAND = 1210,1 KNM/M, MAX MOMENT PLAAT = 212,3 KNM/M

Combinatie 2:  $d_{\text{rand}} = 590 \text{ mm}$     $b_{\text{rand}} = 0,5 \text{ m}$     $b_{\text{plaat}} = 3 \text{ m}$



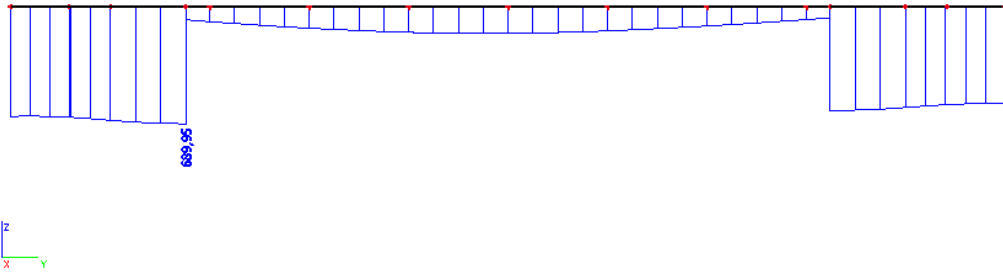
FIGUUR C.18 MOMENTENLIJN IN DOORSNEDE 1 TEN GEVOLGE VAN DE NORMBELASTING. MAX MOMENT RAND = 618,8 KNM/M, MAX MOMENT PLAAT = 281,9 KNM/M

Combinatie 3:  $d_{\text{rand}} = 900 \text{ mm}$     $b_{\text{rand}} = 0,5 \text{ m}$     $b_{\text{plaat}} = 3 \text{ m}$



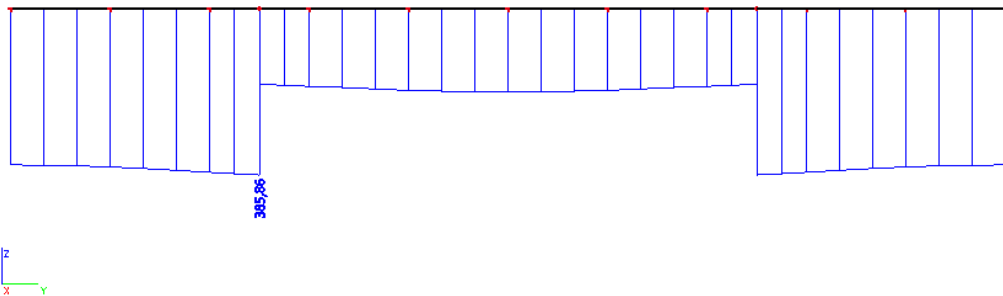
FIGUUR C.19 MOMENTENLIJN IN DOORSNEDE 1 TEN GEVOLGE VAN DE NORMBELASTING. MAX MOMENT RAND = 878,2 KNM/M, MAX MOMENT PLAAT = 131,9 KNM/M

Combinatie 4:  $d_{\text{rand}} = 900 \text{ mm}$      $b_{\text{rand}} = 1,5 \text{ m}$      $b_{\text{plaat}} = 5,5 \text{ m}$



FIGUUR C.20 MOMENTENLIJN IN DOORSNEDE 1 TEN GEVOLGE VAN DE NORMBELASTING. MAX MOMENT RAND = 689,95 KNM/M, MAX MOMENT PLAAT = 158,7 KNM/M

Combinatie 5:  $d_{\text{rand}} = 590 \text{ mm}$      $b_{\text{rand}} = 1,5 \text{ m}$      $b_{\text{plaat}} = 3 \text{ m}$



FIGUUR C.21 MOMENTENLIJN IN DOORSNEDE 1 TEN GEVOLGE VAN DE NORMBELASTING. MAX MOMENT RAND = 385,9 KNM/M, MAX MOMENT PLAAT = 192,1 KNM/M

## Tabellen van resultaten combinaties

Bij elke combinatie is het brugdek belast met de normbelasting. Waarden van  $d_{\text{rand}}$ ,  $b_{\text{rand}}$  en  $b_{\text{plaat}}$  die niet gevarieerd zijn, zijn in de tabellen aangegeven in grijs, gevarieerde waarden zijn in zwart weergegeven.

Referentiemodel:

$d_{\text{rand}} = 590 \text{ mm}$

$B_{\text{rand}} = 1 \text{ m}$

$B_{\text{plaat}} = 5,5 \text{ m}$

$E = 39 \text{ GPa}$

TABEL C.7 RESULTATEN COMBINATIE 1, % VERSCHIL MOMENTEN T.O.V. REFERENTIE. BELASTING MET NORMBELASTING EN E.G.

|                                      | Combinatie 1 | M5d     | M3b    | Referentie |
|--------------------------------------|--------------|---------|--------|------------|
| $d_{\text{rand}} [\text{mm}]$        | 900          | 900     | 590    | 590        |
| $b_{\text{rand}} [\text{m}]$         | 0,5          | 1       | 0,5    | 1          |
| $b_{\text{plaat}} [\text{m}]$        | 5,5          | 5,5     | 5,5    | 5,5        |
| $M_{\text{plaat}} [\text{kNm/m}]$    | 212,33       | 175,59  | 331,02 | 286,99     |
| $M_{\text{rand}} [\text{kNm/m}]$     | 1210,07      | 839,48  | 717,77 | 564,52     |
| $M_{\text{rand}}/M_{\text{plaat}}$   | 5,70         | 4,78    | 2,17   | 1,97       |
| $M_{\text{plaat t.o.v. referentie}}$ | -26,01%      | -38,82% | 15,34% |            |
| $M_{\text{rand t.o.v. referentie}}$  | 114,35%      | 48,71%  | 27,15% |            |

TABEL C.8 RESULTATEN COMBINATIE 2, % VERSCHIL MOMENTEN T.O.V. REFERENTIE. BELASTING MET NORMBELASTING EN E.G.

|                          | Combinatie 2 | M3b    | M2p     | Referentie |
|--------------------------|--------------|--------|---------|------------|
| d_rand [mm]              | 590          | 590    | 590     | 590        |
| b_rand [m]               | 0,5          | 0,5    | 1       | 1          |
| b_plaat [m]              | 3            | 5,5    | 3       | 5,5        |
| Mplaat [kNm/m]           | 281,86       | 331,02 | 221,46  | 286,99     |
| Mrand [kNm/m]            | 618,78       | 717,77 | 461,94  | 564,52     |
| Mrand/Mplaat             | 2,20         | 2,17   | 2,09    | 1,97       |
| Mplaat t.o.v. referentie | -1,79%       | 15,34% | -22,83% |            |
| Mrand t.o.v. referentie  | 9,61%        | 27,15% | -18,17% |            |

TABEL C.9 RESULTATEN COMBINATIE 3, % VERSCHIL MOMENTEN T.O.V. REFERENTIE. BELASTING MET NORMBELASTING EN E.G.

|                          | Combinatie 3 | M3b    | M2p     | M5d     | Referentie |
|--------------------------|--------------|--------|---------|---------|------------|
| d_rand [mm]              | 900          | 590    | 590     | 900     | 590        |
| b_rand [m]               | 0,5          | 0,5    | 1       | 1       | 1          |
| b_plaat [m]              | 3            | 5,5    | 3       | 5,5     | 5,5        |
| Mplaat [kNm/m]           | 131,89       | 331,02 | 221,46  | 175,59  | 286,99     |
| Mrand [kNm/m]            | 878,16       | 717,77 | 461,94  | 839,48  | 564,52     |
| Mrand/Mplaat             | 6,66         | 2,17   | 2,09    | 4,78    | 1,97       |
| Mplaat t.o.v. referentie | -54,04%      | 15,34% | -22,83% | -38,82% |            |
| Mrand t.o.v. referentie  | 55,56%       | 27,15% | -18,17% | 48,71%  |            |

TABEL C.10 RESULTATEN COMBINATIE 4, % VERSCHIL MOMENTEN T.O.V. REFERENTIE. BELASTING MET NORMBELASTING EN E.G.

|                          | Combinatie 4 | M5d     | M2b     | Referentie |
|--------------------------|--------------|---------|---------|------------|
| d_rand [mm]              | 900          | 900     | 590     | 590        |
| b_rand [m]               | 1,5          | 1       | 1,5     | 1          |
| Mplaat [kNm/m]           | 158,73       | 175,59  | 263,07  | 286,99     |
| Mrand [kNm/m]            | 689,95       | 839,48  | 482,71  | 564,52     |
| Mrand/Mplaat             | 4,35         | 4,78    | 1,83    | 1,97       |
| Mplaat t.o.v. referentie | -44,69%      | -38,82% | -8,33%  |            |
| Mrand t.o.v. referentie  | 22,22%       | 48,71%  | -14,49% |            |

TABEL C.11 RESULTATEN COMBINATIE 5, % VERSCHIL MOMENTEN T.O.V. REFERENTIE. BELASTING MET NORMBELASTING EN E.G.

|                          | Combinatie 5 | M2p     | M2b     | Referentie |
|--------------------------|--------------|---------|---------|------------|
| b_plaat [m]              | 3            | 3       | 5,5     | 1          |
| b_rand [m]               | 1,5          | 1       | 1,5     | 5,5        |
| Mplaat [kNm/m]           | 192,11       | 221,46  | 263,07  | 286,99     |
| Mrand [kNm/m]            | 385,86       | 461,94  | 482,71  | 564,52     |
| Mrand/Mplaat             | 2,01         | 2,09    | 1,83    | 1,97       |
| Mplaat t.o.v. referentie | -33,06%      | -22,83% | -8,33%  |            |
| Mrand t.o.v. referentie  | -31,65%      | -18,17% | -14,49% |            |

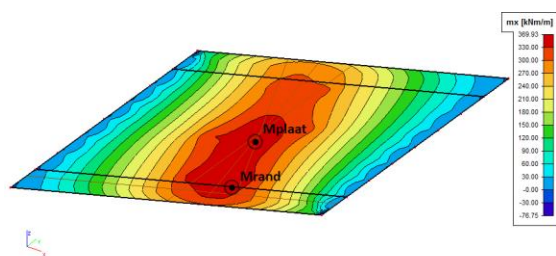
## Bijlage D Resultaten variatie d\_rand scheefstaand brugdek

Belasting door normbelasting; bestaande uit verdeelde belasting, aslasten en eigen gewicht brugdek.

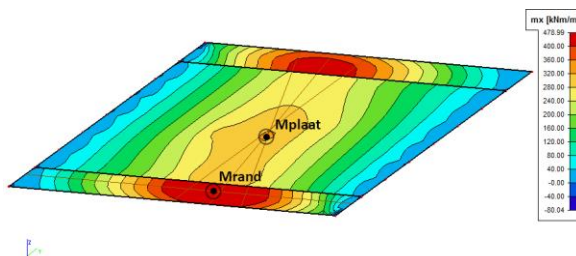
$b_{\text{plaat}} = 5,5 \text{ m}$

$b_{\text{rand}} = 1 \text{ m}$

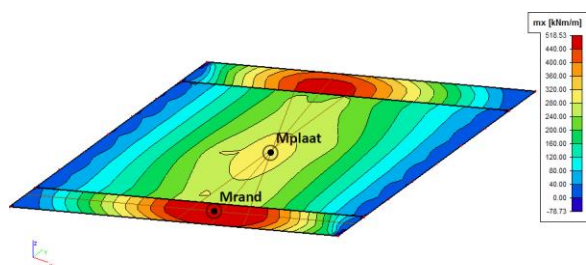
$E = 39 \text{ GPa}$



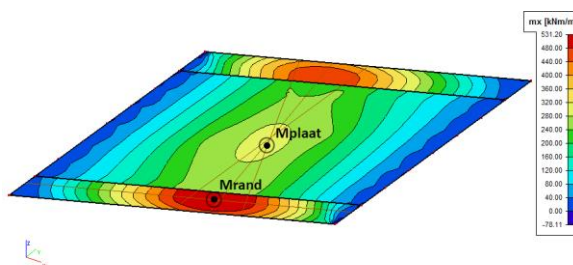
FIGUUR D.1  $D_{\text{RAND}} = 450 \text{ MM}$ ;  $M_{\text{RAND}} = 369,93 \text{ KNM/M}$ ,  $M_{\text{PLAAT}} = 349,52 \text{ KNM/M}$



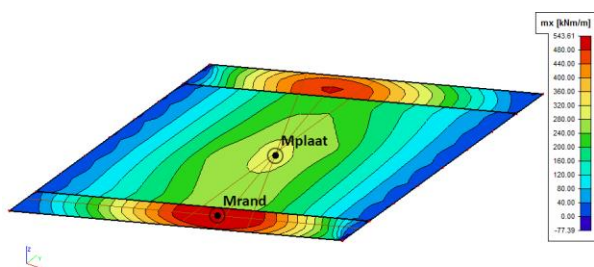
FIGUUR D.2  $D_{\text{RAND}} = 550 \text{ MM}$ ;  $M_{\text{RAND}} = 507,75 \text{ KNM/M}$ ,  $M_{\text{PLAAT}} = 306,28 \text{ KNM/M}$



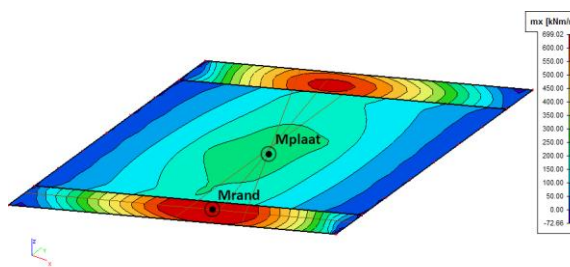
FIGUUR D.3  $D_{\text{RAND}} = 580 \text{ MM}$ ;  $M_{\text{RAND}} = 550,79 \text{ KNM/M}$ ,  $M_{\text{PLAAT}} = 291,76 \text{ KNM/M}$



FIGUUR D.4  $D_{\text{RAND}} = 590 \text{ MM}$ ;  $M_{\text{RAND}} = 564,52 \text{ KNM/M}$ ,  $M_{\text{PLAAT}} = 286,99 \text{ KNM/M}$



FIGUUR D.5  $D_{\text{RAND}} = 600 \text{ MM}$ ;  $M_{\text{RAND}} = 577,92 \text{ KNM/M}$ ,  $M_{\text{PLAAT}} = 282,26 \text{ KNM/M}$

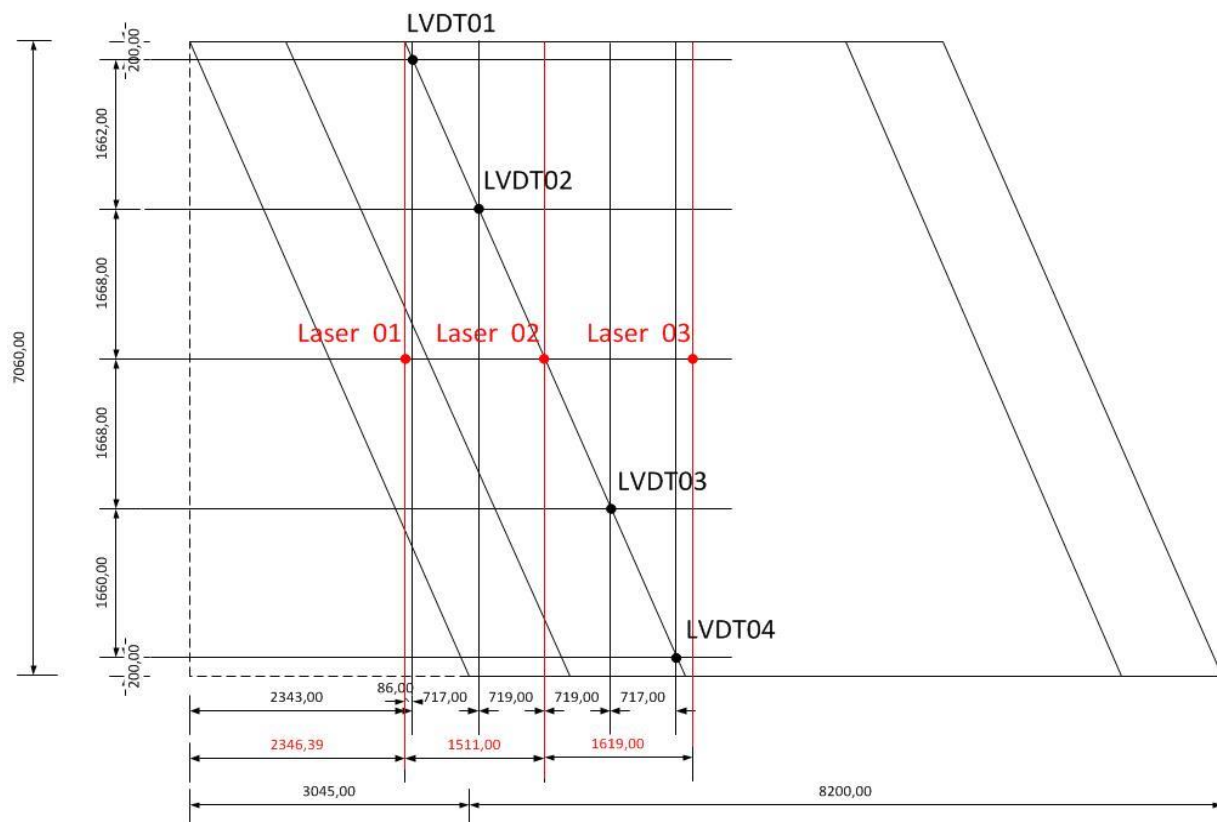


FIGUUR D.6  $D_{\text{RAND}} = 750 \text{ MM}$ ;  $M_{\text{RAND}} = 739,43 \text{ KNM/M}$ ,  $M_{\text{PLAAT}} = 219,66 \text{ KNM/M}$

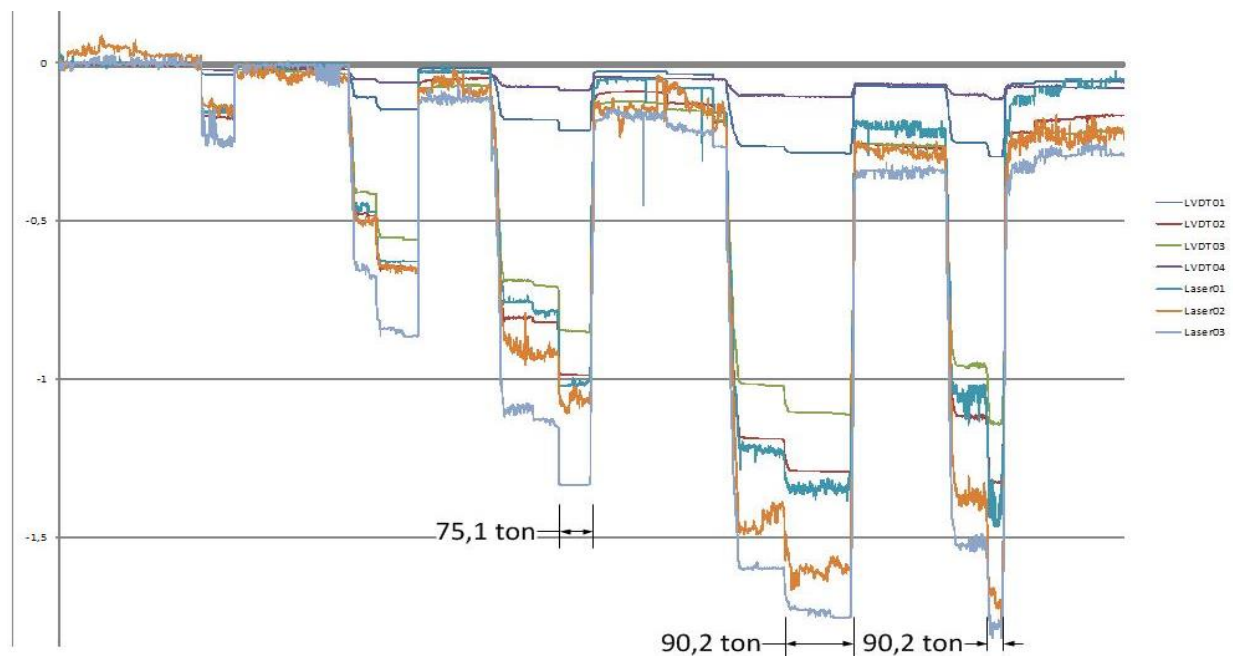
TABEL D.1 RESULTATEN VARIATIE  $D_{\text{RAND}}$  BIJ SCHEEF BRUGDEK, % VERANDERING MOMENTEN T.O.V. REFERENTIE

| $d_{\text{rand}} [\text{mm}]$                 | 450<br>M1s – referentie | 550<br>M2s | 580<br>M3s | 590<br>M4s | 600<br>M5s | 750<br>M6s |
|-----------------------------------------------|-------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| % verandering dikte                           |                         | 22,2%      | 28,9%      | 31,1%      | 33,3%      | 66,7%      |
| $M_{\text{plaat}} [\text{kNm/m}]$             | 369,93                  | 328,15     | 315,32     | 311,08     | 306,88     | 250,2      |
| $M_{\text{rand}} [\text{kNm/m}]$              | 344,12                  | 478,99     | 518,53     | 531,2      | 543,61     | 699,02     |
| Verhouding $M_{\text{rand}}/M_{\text{plaat}}$ | 0,93                    | 1,46       | 1,64       | 1,71       | 1,77       | 2,79       |
| % verandering $M_{\text{plaat}}$ t.o.v. ref.  |                         | -11,3%     | -14,8%     | -15,9%     | -17,0%     | -32,4%     |
| % verandering $M_{\text{rand}}$ t.o.v. ref.   |                         | 39,2%      | 50,7%      | 54,4%      | 58,0%      | 103,1%     |

## Bijlage E Meetresultaten



FIGUUR E.1 LOCATIES MEETPUNTEN; LVDT'S EN LASERS [MM]



FIGUUR E.2 MEETRESULTATEN VAN ELK MEETPUNT. X-AS = TIJD, Y-AS = VERPLAATSING

In de grafiek is te zien dat het brugdek twee keer is belast met de maximale belasting van 90,2 ton: als waarde voor de verplaatsing bij deze belasting is de maximale waarde genomen die is opgetreden tijdens beide keren belasten.

TABEL E.1 BELASTINGSSTAPPEN BIJ BEPROEVING HALVEMAANSBRUG; BIJBEHORENDE GROOTTE PUNTLASTEN VAN HET TANDEMSTELSEL (TS)

| Tijd (s)        | Totale belasting (ton) | Totale belasting (kN) | Grootte puntlasten in TS (kN) |
|-----------------|------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| 1946,55         | 12,90                  | 126,55                |                               |
| 2380,55         | 12,90                  | 126,55                |                               |
| 4022,55         | 37,50                  | 367,88                |                               |
| 4314,55         | 37,50                  | 367,88                |                               |
| 4344,55         | 50,90                  | 499,33                |                               |
| 4892,55         | 50,90                  | 499,33                |                               |
| 6054,55         | 62,40                  | 612,14                |                               |
| 6800,55         | 62,40                  | 612,14                |                               |
| <b>6814,55</b>  | <b>75,10</b>           | <b>736,73</b>         | <b>184,2</b>                  |
| 7224,55         | 75,10                  | 736,73                |                               |
| 9270,55         | 85,60                  | 839,74                |                               |
| 9896,55         | 85,60                  | 839,74                |                               |
| <b>9926,55</b>  | <b>90,20</b>           | <b>884,86</b>         | <b>221,2</b>                  |
| 10800,55        | 90,20                  | 884,86                |                               |
| 12210,55        | 74,40                  | 729,86                |                               |
| 12644,55        | 74,40                  | 729,86                |                               |
| <b>12684,55</b> | <b>90,20</b>           | <b>884,86</b>         | <b>221,2</b>                  |
| 12864,55        | 90,20                  | 884,86                |                               |