



# Modelling van een transitiezone in Ansys

*Bachelor Eindwerk*

Jorn van Akker - 4695623  
Civiele Techniek  
Railway Engineering

*Begeleiders:*  
Dr. V.L. Markine  
Dr. Z. Yang

15 juni 2020

---

Afbeelding titelpagina: Kim, S. (nd). Grijze metalen spoorweg [Foto]. Opgehaald van <https://unsplash.com/photos/eqCfMZmysK4>

## VOORWOORD

Dit rapport is het eindresultaat van mijn onderzoek naar transitiezones en in het bijzonder naar het ontwikkelen van een model van deze zones. Deze scriptie is geschreven in het kader van het afronden van de bacheloropleiding Civiele Techniek aan de Technische Universiteit Delft. Het eindproject is het sluitstuk van deze driejarige opleiding waarbij alle kennis die vergaard is als basis dient om dit rapport te kunnen schrijven.

Bij dezen wil ik graag mijn begeleiders dr. Valeri Markine en dr. Zhen Yang hartelijk bedanken voor de begeleiding en ondersteuning die ze mij hebben gegeven. Juist in deze onzekere tijden waarbij persoonlijk contact is bemoeilijkt en alle gesprekken digitaal dienden te worden gevoerd, hebben ze mij op een fijne manier ondersteund. Nogmaals dank hiervoor!

Het laatste wat mij nog rest, is u als lezer veel leesplezier toe te wensen!

Jorn van Akker

Suwâld, juni 2020

## SAMENVATTING

Transitiezones zorgen in de railbouwkunde al geruime tijd voor problemen. De werkelijke oorzaken van deze overgangen van regulier spoor naar een civiel kunstwerk blijven onduidelijk, terwijl de onderhoudskosten significant hoger zijn ten opzichte van andere delen van het spoor. Daarom is het interessant om meer inzicht te krijgen in deze transitiezones en welke responsies zij leveren bij een overrijdende trein.

Het doel van dit rapport is om deze responsies in kaart te brengen en vervolgens het effect van enkele maatregelen op deze responsies te toetsen. Dit leidt tot de volgende onderzoeksvraag: *Hoe kunnen de responsies in een transitiezone met gebruik van de eindige-elementenmethode in een model worden verduidelijkt?*

Voor het modelleren wordt gebruikgemaakt van het eindige-elementenmethodeprogramma Ansys. Als uitgangspunt voor het model wordt de labopstelling van de TU Delft genomen. In deze opstelling bestaat de transitiezone uit een bak met ballast met daaroverheen een spoorweg. Aan de uiteinden vormen stalen liggers het regulier spoor en het civiel kunstwerk.

Het gecreëerde model wordt vergeleken met de analytische Zimmermanmethode om het model te kunnen valideren. Verder geeft het Ansysmodel extra inzicht in de directe overgang van regulier spoor op het civiel kunstwerk en kunnen ontstane spanningen beter worden bepaald.

Drie mogelijke maatregelen worden aangedragen om de spanningen en verplaatsingen te verminderen in de transitiezone, waardoor er een daling in de onderhoudskosten kan worden bereikt. Deze drie maatregelen, het verbreden van dwarsliggers, het aanbrengen van railframes en het verlijmen van ballast, zijn alle gericht op de bovenbouw, omdat deze op relatief korte termijn kunnen worden geïmplementeerd.

Wat betreft de zakkingen in y-richting worden deze bij alle drie maatregelen kleiner. Hierbij zorgen de verbrede dwarsliggers en de railframes voor enkele procenten mindering van de normale zakking. Het verlijmen van ballast heeft nog meer effect. Met deze maatregel kan de maximale zakking met meer dan dertig procent worden gereduceerd.

Als er gekeken wordt naar de verandering in spanning in het ballastbed en de ondergrond als gevolg van de voorgestelde maatregelen, kan een minder eenduidig beeld worden geschetst. Sommige spanningen nemen toe, terwijl andere spanningen kleiner worden. Wel kan worden gesteld dat door het verlijmen van ballast de spanning in de ondergrond toeneemt.

Om die reden is het niet mogelijk om één maatregel te kiezen die het beste werkt om de problemen in de transitiezone op te lossen. Op basis van de zakkingen heeft het verlijmen van ballast het meeste effect, terwijl de verbrede dwarsliggers en de railframes juist zorgen voor een afname ofwel het gelijk blijven van de spanningen in het ballastbed en de ondergrond.

# INHOUD

<b>Voorwoord</b> .....	3
<b>Samenvatting</b> .....	4
<b>1. Inleiding</b> .....	6
<b>2. Probleemanalyse</b> .....	7
<b>3. Modelling van een transitiezone</b> .....	9
3.1 Proefopstelling.....	9
3.2 Materiaalgegevens spooronderdelen.....	10
3.3 Modelling in Ansys.....	10
<b>4. Bepaling responsies vanuit model</b> .....	13
4.1 Uitkomsten model.....	13
4.2 Validatie met Zimmermanmodel.....	15
4.3 Vergelijking Ansysmodel en Zimmermanmodel.....	17
<b>5. Modelling maatregelen</b> .....	18
5.1 Maatregelen transitiezone.....	18
5.1.1 Verbrede dwarsliggers.....	18
5.1.2 Railframe.....	18
5.1.3 Verlijmde ballast.....	19
5.2 Modelling in Ansys.....	19
5.2.1 Verbrede dwarsliggers.....	19
5.2.2 Railframe.....	19
5.2.3 Verlijmde ballast.....	20
<b>6. Effect Maatregelen</b> .....	21
6.1 Verbrede dwarsliggers.....	21
6.2 Railframe.....	22
6.3 Verlijmde ballast.....	24
6.4 Overzicht maatregelen en resultaat.....	26
<b>7. Discussie</b> .....	27
<b>8. Conclusie</b> .....	29
<b>Bibliografie</b> .....	31

# 1. INLEIDING

Transitiezones vormen reeds jarenlang een grote zorg voor spoorinfrastructuurbeheerders. Ondanks vele onderzoeken blijft het lastig om het gedrag van transitiezones goed in kaart te brengen. Deze zones komen veelal voor bij overgangen tussen civiele kunstwerken zoals tunnels, duikers en bruggen enerzijds en regulier spoor anderzijds, omdat de onderlinge stijfheden van deze onderdelen sterk verschillen. Met name in gebieden met een zachte ondergrond, zoals Nederland, zorgt deze divergentie in stijfheden voor problemen. Deze plaatsen in het spoornetwerk hebben namelijk vaak substantieel extra onderhoud nodig om de kwaliteit te kunnen behouden. Deze onderhoudswerkzaamheden kosten vanzelfsprekend extra geld en zijn oorzaak van vertragingen (Zuada Coelho, 2011).

Vanwege deze negatieve gevolgen is het belangrijk om inzicht te krijgen in de oorzaak van deze slechte prestaties van transitiezones. Deze inzichten kunnen worden verkregen met behulp van simulatiemodellenprogramma's, zoals Ansys. Het doel van dit onderzoek is dan ook om de situatie rondom transitiezones te modelleren en mogelijke effecten van maatregelen in kaart te brengen. De onderzoeksvraag waar dit rapport antwoord op geeft, luidt:

*Hoe kunnen de responsies in een transitiezone met gebruik van de eindige-elementenmethode in een model worden verduidelijkt?*

Om deze onderzoeksvraag te beantwoorden, wordt gebruikgemaakt van een vijftal deelvragen. Allereerst een vraag om duidelijk te maken wat de relevantie van het rapport is: *Wat zijn typische problemen in transitiezones?* Vervolgens is het nuttig om dit probleem te operationaliseren: *Hoe kan een transitiezone worden gemodelleerd?* Daarnaast is het ook belangrijk om de resultaten te kunnen duiden: *Welke responsies kunnen bijdragen aan het vinden van een oplossing voor transitiezones?* Hierbij wordt ook het model gevalideerd door de responsies te vergelijken met een analytische oplossing. Om maatregelen te kunnen aandragen voor het probleem, dienen deze in het model te worden ingepast: *Hoe kunnen de maatregelen worden gemodelleerd?* Uiteindelijk zal het effect van mogelijk maatregelen moeten worden getest aan de hand van het model: *Welke maatregelen hebben effect op de responsies in een transitiezone?*

Dit onderzoek zal starten met wetenschappelijk literatuuronderzoek om het probleem te kunnen duiden. Vervolgens zal gebruik worden gemaakt van het modelprogramma Ansys om transitiezones met behulp van de eindige-elementenmethode te simuleren. Dit rapport tracht een dergelijk model te ontwikkelen, waarmee de responsies in de transitiezones en het effect op deze responsies door het nemen van maatregelen in kaart kunnen worden gebracht.

Het rapport is als volgt opgebouwd: allereerst zal in hoofdstuk 2 het probleem geanalyseerd worden. Vervolgens zal in hoofdstuk 3 een model worden gemaakt waarin een transitiezone wordt gemodelleerd. Daarna zullen in hoofdstuk 4 de uitkomsten van het model worden weergegeven en worden de responsies geanalyseerd en gevalideerd met behulp van een analytische methode. In hoofdstuk 5 zullen vervolgens de maatregelen worden gemodelleerd. In hoofdstuk 6 zal het effect van maatregelen aan de hand van het model worden getoetst. Hoofdstuk 7 biedt een discussie van dit rapport. Ten slotte zal in hoofdstuk 8 een conclusie worden getrokken.

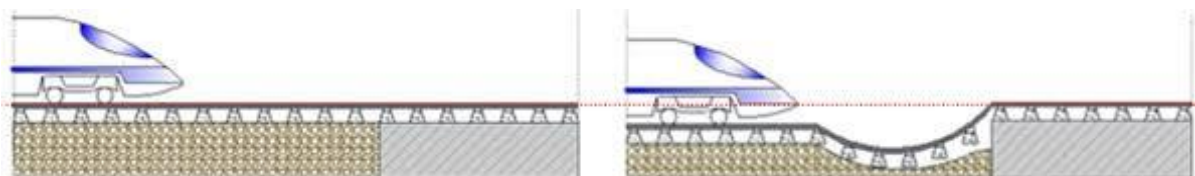
## 2. PROBLEEMANALYSE

Om de responsies in een transitiezone te kunnen begrijpen, wordt in dit hoofdstuk het probleem rondom transitiezones uiteengezet. Allereerst wordt het begrip transitiezone gespecificeerd en vervolgens worden de oorzaken voor het probleem aangewezen.

Een transitiezone in het spoor kenmerkt zich door de overgang tussen verschillende onderdelen van het spoor met enerzijds regulier spoor en anderzijds een civiel kunstwerk. Voorbeelden hiervan zijn bruggen en onderdoorgangen. Deze overgang zorgt voor problemen door een verschil in gedrag bij dynamische belasting van een railvoertuig. Voorbeelden van deze problemen zijn het ontstaan van scheuren, hangende dwarsliggers en blijvende vervormingen van het spoor. Uiteindelijk kan dit zelfs leiden tot een ontsporing (Wang, Markine, Shevtsov, & Dollevoet, 2015).

Er zijn verschillende oorzaken aan te wijzen voor deze problemen. Deze zijn terug te brengen tot drie hoofdoorzaken: veranderingen in de spoorstijfheid, hogere zetting van regulier spoor dan het kunstwerk deel en onzorgvuldigheden op geotechnisch gebied (Li & Davis, 2005). In het hiernavolgende zullen deze drie oorzaken kort aan bod komen.

Veranderingen in de spoorstijfheid creëren ongelijkmatigheden, waardoor er extra dynamische krachten ontstaan. Op een gegeven moment worden deze extra krachten zo groot dat er ongelijkmatige zakkingen ontstaan waardoor de spoorstaven verticaal niet meer goed op elkaar aansluiten, zoals te zien is in Figuur 2.1. Deze ongelijkmatige zakking leidt weer tot extra krachten, waardoor de verticale aansluiting opnieuw verslechtert (Wang et al., 2015). Eenmaal begonnen is dit dus een zichzelf versnellend proces.



Figuur 2.1: Ontwikkeling transitiezone (Wang, 2018)

Ten tweede heeft regulier spoor van nature een hogere zetting dan het kunstwerk. Dit komt door de verschillende materiaaleigenschappen van de twee onderdelen. Regulier spoor met ballast en de grondlagen daaronder zakken van nature meer dan het civiel kunstwerk. Het civiel kunstwerk heeft namelijk een hogere stijfheid dan regulier spoor met ballast. Over de lengte van het spoor zakken de spoorstaven onregelmatig, waardoor de staven onjuist met elkaar verbonden zijn. Uiteindelijk kan dit zelfs leiden tot hangende dwarsliggers, waarbij ontstaan gaten onder de dwarsliggers, waardoor de ondersteuning wegvalt en de plaatselijke spoorstijfheid zeer laag is (Wang et al., 2015).

Ten slotte kunnen onzorgvuldigheden op geotechnisch gebied problemen veroorzaken. De transitiezones zijn kritieke locaties waar falen van de ondergrond kan optreden. Deze locaties ervaren namelijk een grote axiale belasting, waardoor extra dynamische krachten door de ondergrond moeten worden verwerkt. Fouten in de constructiefase kunnen ervoor zorgen dat

deze krachten niet kunnen worden opgenomen en de ondergrond zal falen (Gallage, Dareeju, & Dhanasekar, 2013).

Bovenstaande oorzaken dienen serieus te worden genomen. De eerste twee genoemde oorzaken zijn namelijk zichzelf versnellende processen. Als het spoor eenmaal met te veel dynamische krachten wordt belast, zullen zakkingen in het spoor ontstaan. Door deze zakkingen nemen de krachten weer toe, waardoor de zakkingen steeds onregelmatiger zullen worden. Om dit te voorkomen dienen transitiezones extra te worden onderhouden. Het is daarom dat in Nederland transitiezones vier tot achtmaal vaker onderhoud nodig hebben dan regulier spoor, wat betekent dat dit onderhoud een groot deel van de onderhoudskosten veroorzaakt. Dit extra onderhoud is nodig om te voorkomen dat de kwaliteit van het desbetreffende spoor verslechtert. Als het onderhoud niet tijdig wordt gedaan, kan dit namelijk leiden tot scheuren en verpulvering van de ballast, hangende dwarsliggers en blijvende vervorming van de rails. Wordt het onderhoud nog langer uitgesteld dan kan dit zelfs leiden tot een ontsporing (Wang et al., 2015).



### 3. MODELLERING VAN EEN TRANSITIEZONE

In dit hoofdstuk wordt beschreven hoe een transitiezone kan worden gemodelleerd in het simulatieprogramma Ansys dat gebruikmaakt van de eindige-elementenmethode. Allereerst wordt een proefopstelling van de TU Delft geïntroduceerd waarna de belangrijkste spooronderdelen aan bod komen. Deze worden uiteindelijk gemodelleerd in Ansys.

#### 3.1 Proefopstelling

Voor de modellering van de transitiezone wordt gebruikgemaakt van de opstelling die gebruikt wordt in het lab van de TU Delft. De transitiezone wordt hier zodanig gemodelleerd dat er duidelijk drie delen zijn te onderscheiden: regulier spoor, de transitiezone en het civiel kunstwerk.

In de hierboven genoemde opstelling zijn het regulier spoor en het civiel kunstwerk gemaakt van stalen liggers. De transitiezone is gemaakt van een houten bak gevuld met ballast. Op deze onderdelen zijn spoorstaven en dwarsliggers geplaatst waarover het testvoertuig heen kan rijden. In Figuur 3.1 is de bedoelde opstelling van de TU Delft te zien.



Figuur 3.1: Opstelling transitiezone TU Delft (Markine, 2019)

## 3.2 Materiaalgegevens spooronderdelen

Voor de afmetingen en materiaalgegevens van de verschillende onderdelen wordt de rapportage *Gegevens bovenbouw en ballastbed* aangehouden. Alle relevante waarden zijn terug te vinden in Tabel 3.1. In deze tabel wordt de meest gebruikte variant van het onderdeel aangehouden. Voor spoorstaven is dit het type UIC 54, voor dwarsliggers een mono blok van beton en voor het ballastbed wordt steenslag 30/63 aangehouden (Kuipers, 1997).

Verder dient nog te worden opgemerkt dat de onderlinge afstand van de dwarsliggers, oftewel de hart-op-hart-afstand, gelijk is aan 600 mm (Kuipers, 1997).

Tabel 3.1: Gegevens spooronderdelen

Onderdeel	Type	Hoogte (h) [mm]	Breedte (b) [mm]	Massa (m) [kg/m]	E-modulus (E) [kN/mm <sup>2</sup> ]	Poisson ratio (ν)
Spoorstaaf	UIC 54	159	140	54,4	210	0,30

Onderdeel	Type	Lengte (l) [mm]	Hoogte (h) [mm]	Breedte (b) [mm]	Massa (m) [kg]	E-modulus (E) [kN/mm <sup>2</sup> ]	Poisson ratio (ν)
Dwarsligger	Mono blok	2600	229	300	250	40-45	0,20

Onderdeel	Type	Dikte (minimaal) (d) [mm]	Dichtheid (ρ) [kN/m <sup>3</sup> ]	E-modulus (E) [kN/mm <sup>2</sup> ]	Poisson ratio (ν)
Ballastbed	Steenslag 30/63	300	16	0,150	0,30

## 3.3 Modelling in Ansys

In Ansys dient de vertaling van de spooronderdelen naar elementen in het programma te worden gemaakt. Hiervoor zal gebruik worden gemaakt van een stappenplan gebaseerd op het hoofdmenu in Ansys. Achtereenvolgens zullen de volgende stappen worden doorlopen: *element type*, *material properties*, *sections*, *modelling*, *meshing* en *loads*. In het hiernavolgende zullen deze stappen aan de orde komen. Figuur 3.2 geeft een kort overzicht van dit stappenplan.

De modellering van de transitiezone start met het selecteren van het element type. Hiervoor wordt gebruikgemaakt van twee verschillende elementen. Voor de dwarsligger en het ballastbed wordt het element *solid* gebruikt en voor de spoorstaaf het element *beam*.

Vervolgens worden de materiaaleigenschappen gespecificeerd voor beide elementen. Uitgegaan wordt van isotrope materialen met lineair elastisch gedrag. Dit laatste betekent dat de rek en de spanningen lineair afhankelijk van elkaar zijn met een constante elasticiteitsmodulus  $E$  (Hartsuijker, 2016). Deze aanname is aanvaardbaar, omdat het te verwachten is dat de spanning in het materiaal zodanig klein is dat deze onder de vloeigrens blijft.

Zoals eerder gezegd wordt verder uitgegaan van isotrope materialen. Een materiaal is isotroop als de materiaaleigenschappen in elk punt constant zijn en daarbij niet afhankelijk van de richting (Hartsuijker, 2016). Ook deze aanname lijkt waarschijnlijk. Het staal en beton dat wordt gebruikt voor respectievelijk de spoorstaaf en de dwarsligger, zijn materialen die in zijn algemeenheid isotroop kunnen worden verondersteld. Om de materiaaleigenschappen vast te stellen onder deze condities zijn de elasticiteitsmodulus  $E$  en Poisson ratio  $\nu$  vereist. Hiervoor wordt gebruikgemaakt van Tabel 3.1.

In het submenu *sections* worden vervolgens de doorsnedegrootheden bepaald voor de spoorstaaf gebruikmakend van Tabel 3.1. Voor de andere elementen is dit niet nodig, omdat deze in tegenstelling tot de spoorstaaf niet opgebouwd zijn uit een lijnelement.

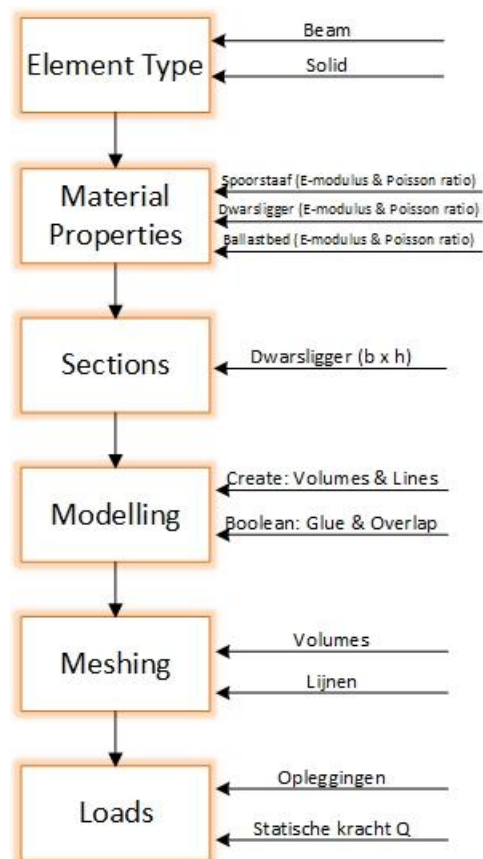
Na de doorsnedegrootheden te hebben gespecificeerd dienen de spooronderdelen te worden gemodelleerd. Een dwarsligger bestaat uit drie volumes: één voor het gedeelte tussen de spoorstaven en twee voor het deel aan de uiteinden. Om de dwarsligger met drie volumes te modelleren in plaats van één volume, heeft als voordeel dat de spoorstaaf en de dwarsligger dan gezamenlijke knooppunten hebben.

Voor de dwarsdoorsnede van het volume wordt Tabel 3.1 gebruikt. Voor de lengte van de drie volumes wordt ook Tabel 3.1 gebruikt met als aanvulling dat het deel tussen de twee spoorstaven, de spoorwijdte, gelijk is aan 1435 mm (Kuipers, 1997). Dit betekent dat het middelste volume een lengte heeft van 1435 mm en dat de twee buitenste volumes beide een lengte hebben van 582,5 mm. De totale lengte van de dwarsligger is dan 2600 mm.

Vervolgens worden de drie volumes aan elkaar gekoppeld door de functie *glue* onder *booleans* te gebruiken, zodat de dwarsligger één geheel wordt. De dwarsligger komt dan overeen met het type mono blok wat het meest voorkomend is in de spoorbouw.

Voor de spoorstaaf wordt in tegenstelling tot de dwarsligger geen volume gebruikt, maar een lijnelement. Deze lijn wordt tussen de volumes ter hoogte van de grenzen van de volumes geplaatst. Zo worden haaks op de dwarsliggers twee spoorstaven gemodelleerd. Met behulp van de *booleans operation overlap* wordt voorkomen dat er dubbele lijnen ontstaan op dezelfde plaats.

Als laatste wordt de ondersteuning van het spoor gemodelleerd. Voor de transitiezone betreft dit het ballastbed en voor het civiel kunstwerk betreft dit de constructie waar het spoor gebruik van maakt. De ondersteuning wordt gemodelleerd door een volume onder de dwarsliggers te plaatsen. Voor de transitiezone heeft het volume de materiaaleigenschappen van het ballastbed en voor de overige delen heeft het volume de materiaaleigenschappen van een stalen ligger. Voor de stalen ligger worden als E-modulus 210 GPa en Poisson ratio 0,3



Figuur 3.2: Overzicht modellering Ansys

gebruikt. Dit is in overeenstemming met de waarden in Tabel 3.1 van het staal dat wordt gebruikt voor de spoorstaaf. Het gebruik van de volumes is vergelijkbaar met de opstelling met de houten bak en stalen liggers zoals beschreven in paragraaf 3.1.

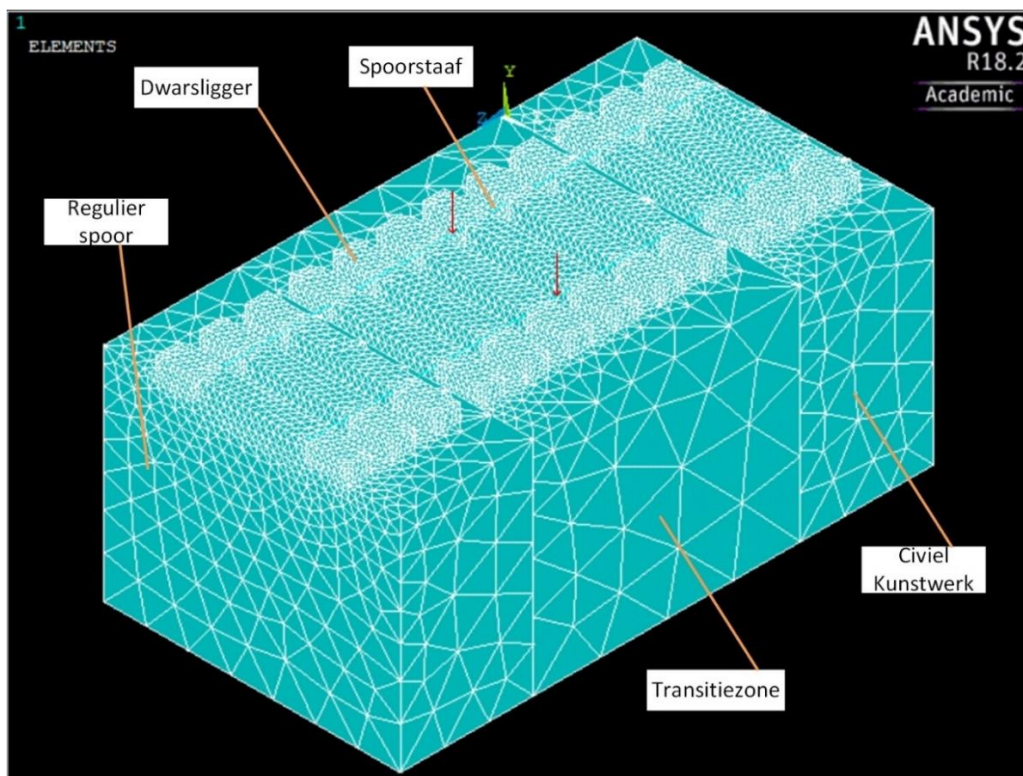
Na *modelling* volgt *meshing*. Bij deze stap worden de lijnen en volumes omgezet tot elementen. De lijnen worden gekoppeld aan het eerder gekozen element type, materiaaleigenschappen en doorsnedegrootheid en de volumes worden gekoppeld aan het element type en materiaaleigenschappen. Verder worden er knopen gecreëerd waarmee de oplossing kan worden bepaald.

De laatste stap betreft het definiëren van de krachten die op het spoor worden uitgevoerd. Deze stap is tweeledig. Enerzijds dienen de beperkingen te worden bepaald in de vorm van opleggingen. Anderzijds worden de krachten waar het spoor aan onderhevig is, toegevoegd aan het model.

De opleggingen dienen te worden geplaatst aan de zijkanten en onderkant van het volume. Deze stellen de randen van de bak met ballast voor. Zoals te zien is in Figuur 3.1 is de ballast aan de zijkant en onderkant ingeklemd door de houten bak. Alle verplaatsing- en rotatievrijheden zijn daarmee beperkt.

De krachten op het spoor zijn afkomstig van de overrijdende treinen. Deze worden gemodelleerd als statische krachten ter grootte van een wiellast. In Nederland wordt de statische aslast gelijkgesteld aan 225 kN (Steenbergen, De Jong en Zoeteman, 2015). Aangenomen wordt dat de aslast gelijkmatige verdeeld wordt over de twee wielen en dus over de twee spoorstaven. De kracht op de spoorstaaf is daarmee gelijk aan 112,5 kN.

Het uiteindelijke model is te zien in Figuur 3.3.



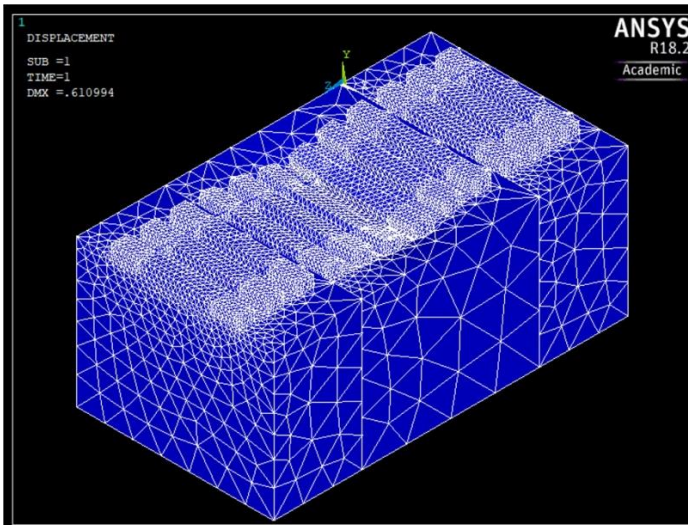
Figuur 3.3: Gecreëerd model in Ansys

## 4. BEPALING RESPONSIES VANUIT MODEL

In dit hoofdstuk komt de oplossing van het Ansysmodel naar voren. Om deze oplossing en daarmee het model te kunnen valideren, dienen de uitkomsten te worden vergeleken met een analytische berekening in de vorm van het Zimmermanmodel.

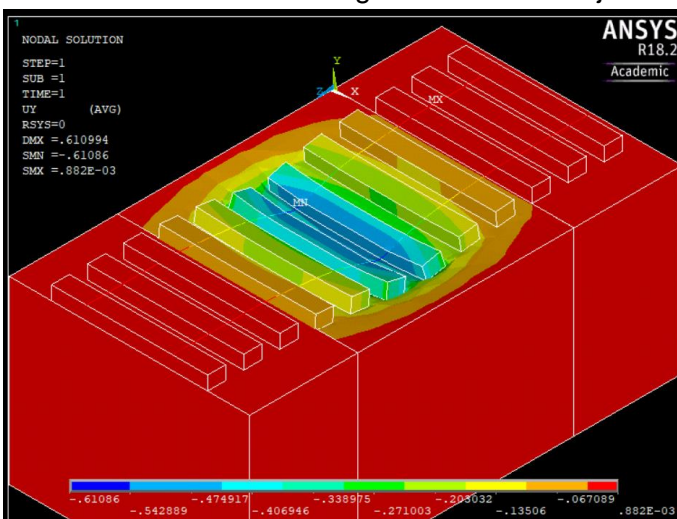
### 4.1 Uitkomsten model

In Figuur 4.1 is de vervorming te zien van het spoor door de toegepaste wielbelasting. Te zien is dat de vervorming logischerwijs met name plaatsvindt op de locatie waar de wielbelasting kracht uitoefent.



Figuur 4.1: Vervorming spoor

In Figuur 4.2 is een contourplot te zien van de knoopverplaatsingen in y-richting in millimeters. Hierin is duidelijker te zien welke onderdelen een verplaatsing ondervinden ten gevolge van de wielbelasting. Wat opvalt, is dat de verplaatsingen binnen de transitiezone groot zijn en buiten de transitiezone, oftewel ter plaatse van het civiel kunstwerk, verwaarloosbaar klein zijn. Dit is te verklaren door het grote verschil in stijfheid van de ondersteuning van het spoor.



Figuur 4.2: Contourplot verplaatsingen y-richting

Naast verplaatsingen is het ook mogelijk andere responsies in de transitiezone te bepalen met behulp van het model. De belangrijkste responsies zijn in dit geval de spanningen. Deze zijn namelijk bepalend in de beoordeling of het materiaal sterk genoeg is om de belasting op te nemen. Het Ansysmodel geeft de mogelijkheid om de spanningen in het ballastbed en de ondergrond te bepalen. Dit onderzoek is gericht op de maximale spanningen, omdat deze uiteindelijk zullen bepalen of de spooronderdelen in staat zijn de belasting op te nemen of dat er een risico is tot falen.

Om later in het rapport de vergelijking te kunnen maken wat de invloed van de maatregelen is op de spanningen in de ballast en de ondergrond wordt gericht op de maximale spanning in deze onderdelen in absolute waarde.

Om de maximale spanning van de ondergrond te bepalen, wordt er gefocust op de onderkant van de transitiezone, daar waar y gelijk is aan -3000 mm. Het gaat hierbij om de spanning op het oppervlak aan de onderkant van het middelste volume. Deze maximale spanning bestaat uit drie verschillende componenten, namelijk de maximale principiële spanning voor alle drie hoofdrichtingen. De gevonden waardes zijn terug te vinden in Tabel 4.1. De mintekens in deze tabel staan voor het feit dat het gaat om een drukspanning.

Om de maximale spanning van het ballastbed te bepalen, worden de knopen van het grote volume dat het ballastbed onder de transitiezone voorstelt, uitgelicht. Op basis hiervan wordt de maximale voorkomende spanning gezocht voor alle drie hoofdrichtingen. Ook deze waardes zijn terug te vinden in Tabel 4.1.

Tabel 4.1: Maximale principiële spanning ballastbed en ondergrond

	$\sigma_1$ [kN/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_2$ [kN/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_3$ [kN/mm <sup>2</sup> ]
<b>Ballastbed</b>	$-2,034 * 10^{-2}$	$-4,661 * 10^{-3}$	$-2,958 * 10^{-2}$
<b>Ondergrond</b>	$-4,712 * 10^{-6}$	$-4,876 * 10^{-6}$	$-1,183 * 10^{-5}$

## 4.2 Validatie met Zimmermanmodel

De controle van het model wordt gedaan door de uitkomsten te vergelijken met een analytische berekening. Voor deze analytische berekening wordt gebruikgemaakt van de Zimmermanmethode. In dit concept wordt de rail gemodelleerd als een doorgaande ligger ondersteund door een elastische fundering. De balk wordt gezien als oneindig doorgaand met ondersteuning op de plaatsen van dwarsliggers.

Met behulp van de Zimmermanmethode is het mogelijk om krachten en verplaatsingen van de ligger op analytische wijze te verkrijgen. Hiervoor wordt gebruikgemaakt van onderstaande differentiaalvergelijking (Prakoso, 2012):

$$EI * k * w'''' + k * w = 0 \quad (4.1)$$

waarin :

$$EI = \text{buigstijfheid} [N * mm^2]$$

$$k = \text{funderingscoëfficiënt} \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$$

$$w = \text{doorbuiging} [mm]$$

$$Q = \text{wielbelasting} [N]$$

$$\text{en randvoorwaarden: } w(\infty) = 0; w'(0) = 0; w'''(0) = \frac{Q}{2EI}$$

De oplossing van de vergelijking 4.1 luidt:

$$w(x) = \frac{QL^3}{8EI} * \eta(x) \quad (4.2)$$

waarin :

$$L = \text{karakterstieke lengte} = \sqrt[4]{\frac{4EI}{k}} [mm]$$

$$\eta(x) = \text{vormfunctie} = e^{-\frac{x}{L}} * \left( \cos\left(\frac{x}{L}\right) + \sin\left(\frac{x}{L}\right) \right) [-] \text{ voor } x \geq 0$$

Met behulp van vergelijking 4.2 is het mogelijk om de verplaatsingen van de rail door de wielbelasting  $Q$  te bepalen en te vergelijken met de uitkomst van het model in Ansys. Om het model objectief te kunnen vergelijken met de uitkomst van vergelijking 4.2, dienen de gebruikte parameters in deze vergelijking overeenkomstig te zijn met de modelparameters.

Voor de wielbelasting  $Q$  wordt de  $112,5 * 10^3$  N aangehouden in overeenstemming met de kracht die gebruikt is in het model.

Om de waarde van de buigstijfheid  $EI$  van de spoorstaaf te bepalen, wordt deze parameter opgesplitst in de elasticiteitsmodulus  $E$  en het oppervlaktetraagheidsmoment  $I$ . Voor rechthoekige doorsneden geldt  $I = \frac{1}{12} * b * h^3$ . Hiervan gebruikmakend, kan de waarde van  $EI$  worden bepaald:  $EI = E * I = 210 * 10^3 * \frac{1}{12} * 140 * 159^3 = 9,85 * 10^{12} N * mm^2$

Voor de funderingscoëfficiënt  $k$  worden twee verschillende waarden gebruikt om zo het verschil in ondergrondse constructie mee te nemen. Om de  $k$  te bepalen wordt gebruikgemaakt van modulus van ondergrondse reactie  $C$  en het verband  $C = \frac{k}{a}$  met  $a$  als hart-op-hart-afstand

van de dwarsliggers. Een passende waarde van  $C$  wordt aangenomen en wordt gesteld op  $C = 0,183 \text{ N/mm}^3$  (Prakoso, 2012).

De waarde van  $k$  voor de transitiezone kan dan gemakkelijk worden bepaald:  $k = C * a = 0,183 * 600 = 109,8 \text{ N/mm}^2$ .

Voor het civiel kunstwerk geldt een andere waarde voor  $C$  en daarmee ook voor  $k$ . Als wordt uitgegaan van een betonnen constructie, kan de waarde van  $C$  worden gesteld op  $0,40 \text{ N/mm}^3$  (Giannakos & Tsoukantas, 2012).

In het geval van het civiel kunstwerk is de waarde van  $k$  dan gelijk aan:  $k = C * a = 0,40 * 600 = 240 \text{ N/mm}^2$ . Wat betreft de andere parameters zal er geen verschil zijn tussen de transitiezone en het civiel kunstwerk.

Met bovenstaande parameters is het mogelijk om de vergelijking voor de zakkingen te bepalen ten gevolge van de wielbelasting volgens het Zimmermannmodel. Voor de transitiezone geldt:

$$L = \sqrt[4]{\frac{4 * 9,85 * 10^{12}}{109,8}} = 774 \text{ mm}$$

$$w(x) = \frac{112500 * 774^3}{8 * 9,85 * 10^{12}} * e^{-\frac{x}{774}} * \left( \cos\left(\frac{x}{774}\right) + \sin\left(\frac{x}{774}\right) \right)$$

$$w(x) = 0,662 * e^{-\frac{x}{774}} * \left( \cos\left(\frac{x}{774}\right) + \sin\left(\frac{x}{774}\right) \right) \text{ voor } x \geq 0 \quad (4.3)$$

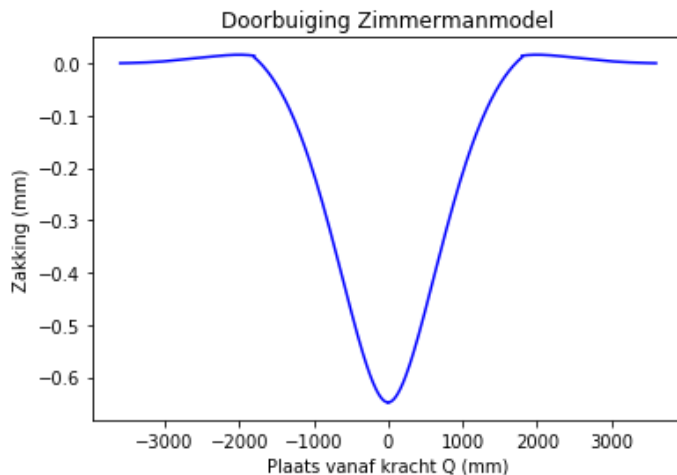
Voor het civiel kunstwerk geldt:

$$L = \sqrt[4]{\frac{4 * 9,85 * 10^{12}}{240}} = 637 \text{ mm}$$

$$w(x) = \frac{112500 * 637^3}{8 * 9,85 * 10^{12}} * e^{-\frac{x}{637}} * \left( \cos\left(\frac{x}{637}\right) + \sin\left(\frac{x}{637}\right) \right)$$

$$w(x) = 0,369 * e^{-\frac{x}{637}} * \left( \cos\left(\frac{x}{637}\right) + \sin\left(\frac{x}{637}\right) \right) \text{ voor } x \geq 0 \quad (4.4)$$

In Figuur 4.3 zijn de vergelijkingen 4.3 en 4.4 gecombineerd tot een diagram dat de zakkingen van de spoorstaaf weergeeft met bovenstaande parameters. Voor  $0 \leq x \leq 1800$  geldt vergelijking 4.3, omdat dit deel de transitiezone beslaat in het Ansysmodel. Voor  $x \geq 1800$  geldt vergelijking 4.4, omdat ter plaatse van  $x = 1800 \text{ mm}$  de overgang plaatsvindt naar het civiel kunstwerk. Verder dient te worden opgemerkt dat het deel van de grafiek waar  $x < 0$  gecreëerd wordt door de grafiek te spiegelen in de  $y$ -as.



Figuur 4.3: Oplossing zakking Zimmermannmodel



### 4.3 Vergelijking Ansysmodel en Zimmermanmodel

Om de vergelijking tussen het gecreëerde Ansysmodel en het analytische Zimmermanmodel mogelijk te maken, dienen vanuit de contourplot in Figuur 4.2 de verplaatsingen in y-richting te worden gehaald voor alleen de knopen van het spoorstaafelement. Omdat er twee spoorstaven zijn, zullen er ook twee krommen uit het model komen. Het is aannemelijk dat deze twee krommen hetzelfde resultaat geven, omdat er sprake is van een symmetrisch spoor met gelijke krachten op beide spoorstaven.

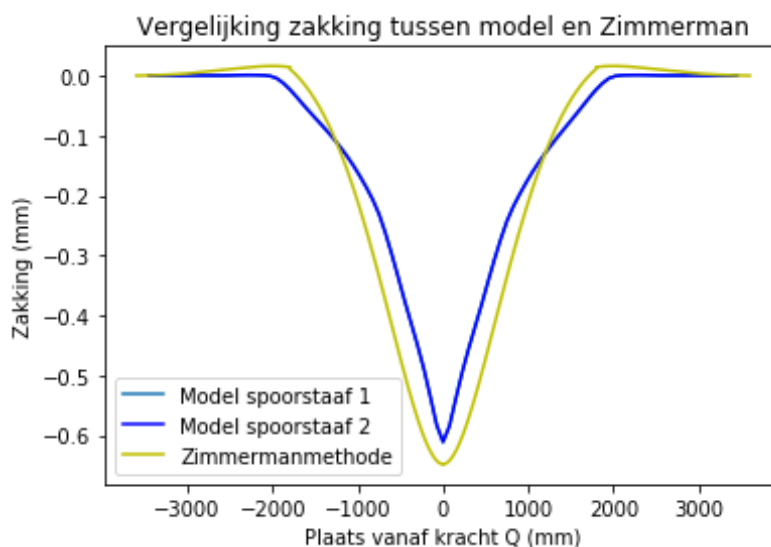
In Figuur 4.4 zijn beide krommen samen met de oplossing volgens het Zimmermanmodel te zien. Zoals verwacht vallen de krommen exact samen, wat betekent dat er inderdaad sprake is van symmetrie.

Wat betreft de vergelijking tussen het Ansysmodel en Zimmermanmodel is er wel enige afwijking te zien. In grote lijnen hebben beide lijnen een vergelijkbaar verloop, maar op een aantal onderdelen komen de lijnen minder overeen. Zo is de maximale zakking in het Zimmermanmodel gelijk aan 0,662 mm en in het Ansysmodel gelijk aan 0,611 mm.

Ook bij de overgang tussen transitiezone en het civiel kunstwerk zijn de verschillen relatief groot. Waar het Zimmermanmodel op deze locatie een kleine positieve verplaatsing in y-richting geeft, loopt de zakking van Ansys hier naar 0 toe.

Dit laatste verschil is te verklaren door het feit dat het Zimmermanmodel minder rekening houdt met de overgang tussen regulier spoor en het civiel kunstwerk. De funderingscoëfficiënt  $k$  is de enige variabele parameter bij de Zimmermanmethode, waardoor het Zimmermanmodel alleen het verloop van zakking aangeeft bij twee verschillende  $k$ -waarden. Het Ansysmodel geeft meer inzicht in de exacte responsies in een transitiezone, omdat hier wel degelijk een transitiezone is gemodelleerd in tegenstelling tot het Zimmermanmodel waar alleen de  $k$  varieert. Zoals in Figuur 4.4 te zien is, vindt de zakking nagenoeg volledig plaats in het deel van de transitiezone omdat de fundering een significant lagere stijfheid heeft dan ter plaatse van de transitiezone.

Verder zijn deze responsies in het Ansysmodel breder te trekken dan alleen de zakkingen, zoals bij het Zimmermanmodel sprake van is. Voorbeelden van deze responsies zijn de spanningen en de rekken in de verschillende onderdelen. In tegenstelling tot het Ansysmodel kunnen deze parameters in het Zimmermanmodel slechts geschat worden met de verplaatsingen



Figuur 4.4: Zakking Ansysmodel en Zimmermanmodel

## 5. MODELLERING MAATREGELEN

In dit hoofdstuk worden diverse maatregelen uiteengezet die de zakkingen rondom de transitiezones kunnen verminderen. Vervolgens worden deze maatregelen in het model verwerkt.

### 5.1 Maatregelen transitiezone

In de literatuur zijn in de loop der tijd vele maatregelen geopperd en onderzocht op hun werking om de zakkingen rondom transitiezones te reduceren. In dit rapport wordt het onderzoek van ProRail naar maatregelen ten behoeve van het reduceren van zakkingen als leidraad genomen (ProRail, 2010). Reden hiervoor is dat dit onderzoek gericht is op maatregelen op constructief gebied waarvan verwacht wordt dat deze in het Ansysmodel kunnen worden verwerkt. In dit rapport van ProRail kunnen de maatregelen op drie verschillende locaties in de constructie genomen worden: de bovenbouwconstructie, de onderbaan en de ondergrond. In het vervolg zal er alleen gericht worden op de bovenbouw als locatie, omdat de maatregelen daar op een redelijke korte termijn geïmplementeerd kunnen worden en deze beter in het Ansysmodel kunnen worden verwerkt.

In de bovenbouwconstructie zijn drie mogelijke maatregelen te nemen die hieronder worden behandeld. Achtereenvolgens zullen verbrede dwarsliggers, railframes en het verlijmen van ballast aan bod komen.

#### 5.1.1 VERBREDE DWARSLIGGERS

Door in de transitiezone bredere dwarsliggers toe te passen dan gebruikelijk, neemt de stijfheid van het spoor toe in de transitiezone. Hierdoor is het verschil in stijfheid tussen regulier spoor en het civiel kunstwerk kleiner, waardoor zettingen zullen worden gereduceerd. Daarnaast kan de belasting over een groter oppervlak worden uitgespreid, waardoor de zakkingen ook worden uitgespreid en daardoor in zijn totaliteit kleiner zullen zijn.

Door de dwarsliggerbreedte geleidelijk te laten toenemen, zal ook het stijfheidsverloop tussen regulier spoor en het civiel kunstwerk geleidelijk toenemen. De reguliere breedte van de dwarsligger van 2600 mm zal via een breedte van 2860 mm toenemen tot uiteindelijk 3120 mm (ProRail, 2010).

#### 5.1.2 RAILFRAME

Een railframe is een horizontale constructie die evenwijdig aan de spoorstaven aan de binnen- en buitenkant wordt geplaatst en voor extra stijfheid van de spoorstaaf zorgt. Door het gebruik van railframes zal de doorbuiging kleiner worden en kunnen zettingen worden gereduceerd. De railframes zijn enkele meters tot enkele tientallen meters lang en zijn slechts tijdelijke maatregelen van maximaal vijf jaar. Verder kunnen ze dienen als stabiliteit van het civiel kunstwerk en in de overgang naar regulier spoor. Ze kunnen zowel aan de binnenkant als aan de buitenkant van het spoor worden gemonteerd, zoals te zien is in Figuur 5.1 (ProRail, 2010).



Figuur 5.1: Railframe (ProRail,2010)

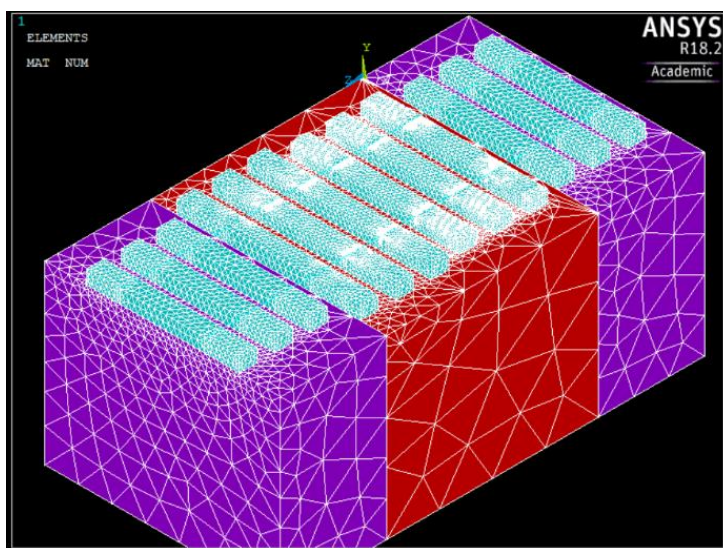
### 5.1.3 VERLIJMDE BALLAST

Bij het verlijmen van ballast worden de ballastkorrels door middel van bindmiddel verlijmd tot één geheel. Als bindmiddel wordt vaak gebruikgemaakt van kunstharlijm. Door van het ballast één geheel te maken, kan het ballastbed beter reageren op belasting en nemen de zakkings af. Om dit werkend te laten worden, zal de ballast tot enkele tientallen centimeters diepte verlijmd moeten worden. Er zijn echter wel enkele aandachtspunten. Het verlijmd ballastbed moet door het bindmiddel niet te stijf worden, omdat dan de elasticiteitsfunctie van de ballast verdwijnt. Verder moeten er genoeg poriën in het ballastbed blijven zitten om hemelwater te kunnen blijven afvoeren (ProRail, 2010).

## 5.2 Modelling in Ansys

### 5.2.1 VERBREDE DWARSLIGGERS

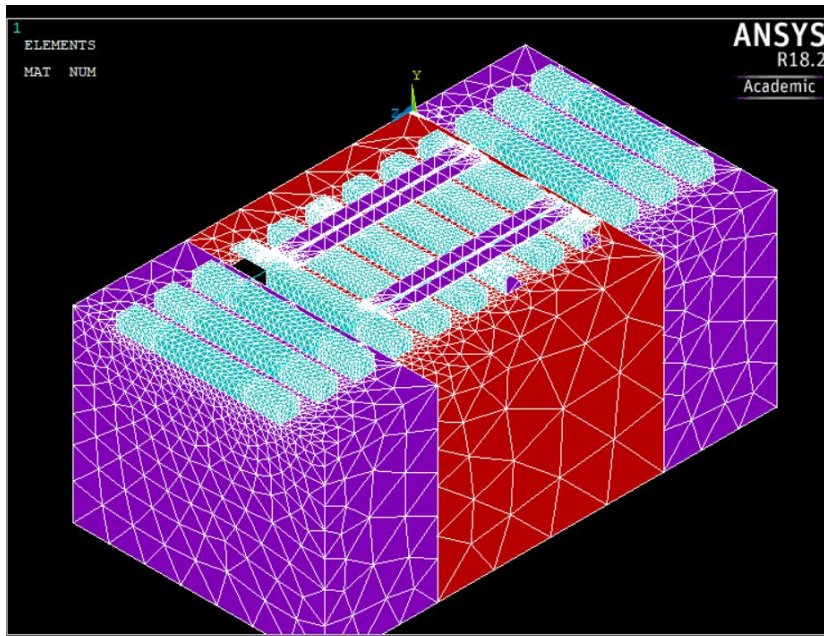
Om de stijfheid van het spoor geleidelijk te laten toenemen, worden de dwarsliggers in twee stappen verbreed. De eerste drie dwarsliggers gezien vanaf het reguliere spoor nemen toe met 260 mm. Om deze verbreding toe te passen in het model worden beide uiteinden van de dwarsligger verlengd met 130 mm. De totale breedte van de dwarsligger is dan 2860 mm. De andere drie dwarsligger bevinden zich dicht bij het civiel kunstwerk en worden nog breder om op die locatie de spoorstijfheid verder te verhogen. Beide uiteinden worden verlengd met 260 mm waarmee de totale breedte van de dwarsligger gelijk is aan 3120 mm. De verwerking van de verbrede dwarsliggers is te zien in Figuur 5.2.



Figuur 5.2: Ansysmodel met verbrede dwarsliggers

### 5.2.2 RAILFRAME

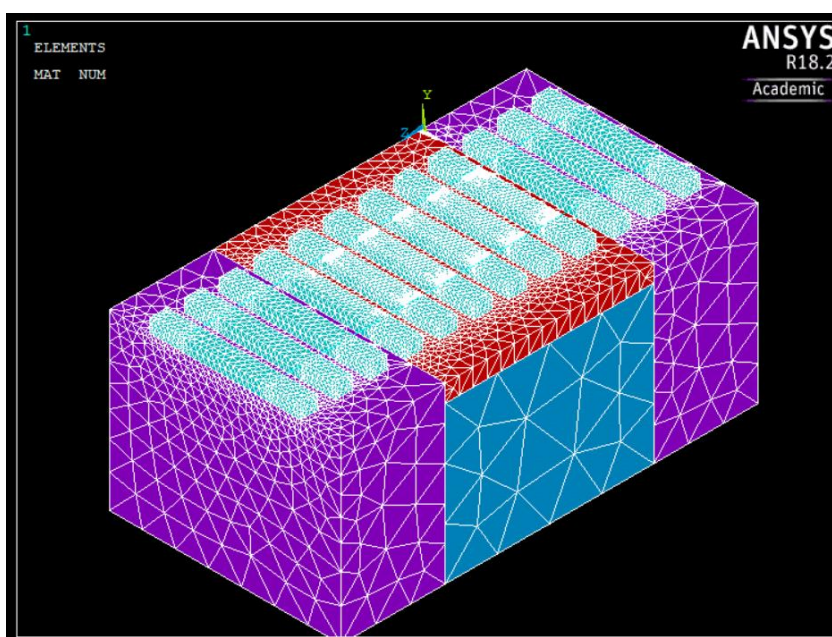
Ter plaatse van de transitiezone worden vier railframes geplaatst vlak naast de spoorstaven: twee per spoorstaaf. Aan zowel de buiten- als de binnenkant van de spoorstaaf worden railframes geplaatst om het maximale effect te kunnen bewerkstelligen. De platen zijn gemaakt van staal en hebben dus dezelfde materiaaleigenschappen als de spoorstaven in Tabel 3.1. De railframes hebben een lengte van 3000 mm, een breedte van 200 mm en een hoogte van 20 mm. De afmetingen zijn daarmee redelijk arbitrair gekozen, maar dit geeft wel inzicht in de mogelijkheden om met behulp van railframes de zakkings te reduceren. In Figuur 5.3 is te zien hoe de railframes in het model zijn verwerkt.



Figuur 5.3: Ansysmodel met railframes

### 5.2.3 VERLIJMDE BALLAST

Om deze maatregel in het model te verwerken, dient het volume onder de transitiezone te worden aangepast. Gekozen wordt om de ballast 30 centimeter diep te verlijmen. Dit is in overeenstemming met hetgeen wat in paragraaf 5.1 staat dat er enkele tientallen centimeters verlijmde ballast nodig zijn om het concept werkend te maken. Voor deze bovenste 30 centimeter zullen de materiaaleigenschappen veranderen. Voor het onderste deel blijven de materiaaleigenschappen gelijk. Voor de bovenste laag ballast neemt de weerstand in verticale richting toe met een factor 3 (ProRail, 2010). Het model dat dan ontstaat, is te zien in Figuur 5.4.



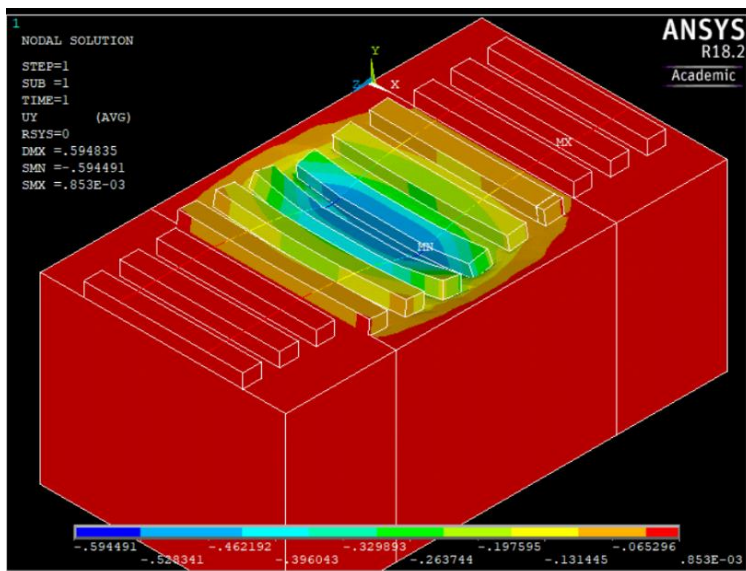
Figuur 5.4: Ansysmodel met verlijmde ballast

## 6. EFFECT MAATREGELEN

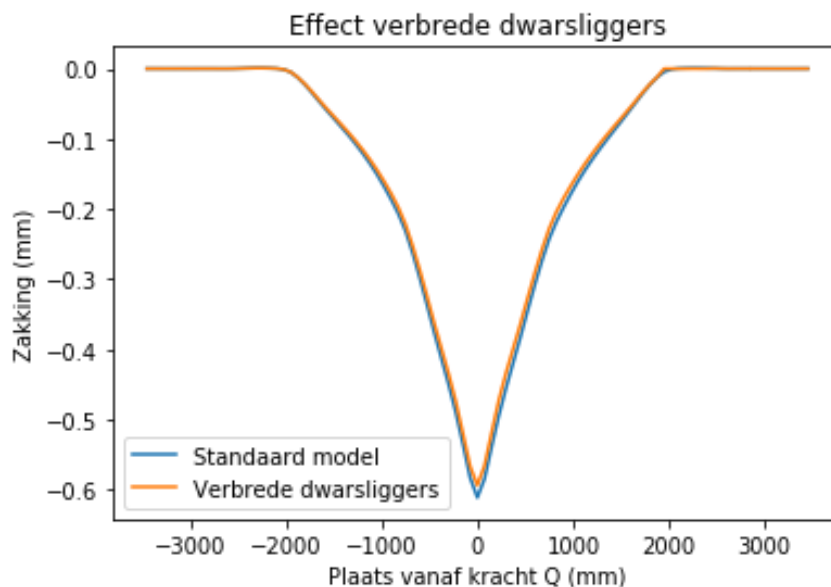
In dit hoofdstuk wordt het effect van de maatregelen getoetst. Er wordt gekeken naar het verschil in zakking van de spoorstaaf en de spanningen in het ballastbed en ondergrond zonder maatregelen en met maatregelen. Andere variabelen, zoals de wielbelasting en de spoorstijfheid zijn gelijk gebleven om de vergelijking zo goed mogelijk te kunnen maken.

### 6.1 Verbrede dwarsliggers

Door verbrede dwarsliggers te gebruiken zou de stijfheid van het spoor moeten toenemen en zou de belasting beter gespreid moeten worden. Op basis van de contourplot in Figuur 6.1 is weinig tot geen verschil te zien met het standaardmodel. Figuur 6.2 laat zien dat de zakking wel iets kleiner is bij gebruik van verbrede dwarsliggers. Zo is de maximale zakking iets kleiner. Verder valt op dat het verschil groter is in positieve x-richting. Dit komt overeen met het feit dat in positieve x-richting de dwarsliggerbreedte toeneemt om een toename in spoorstijfheid te creëren.



Figuur 6.1: Contourplot model met verbrede dwarsliggers



Figuur 6.2: Zakking model met/zonder verbrede dwarsliggers

Naast de zakkingen is het ook interessant hoe de spanningen in het ballastbed en de ondergrond zijn veranderd naar aanleiding van de genomen maatregelen. Om deze spanningen te kunnen vergelijken, wordt gekozen om dezelfde procedure aan te houden als in paragraaf 4.1.

In Tabel 6.1 zijn de maximale principiële spanningen weergegeven voor het ballastbed en de ondergrond met aanwezigheid van verbrede dwarsliggers.

Tabel 6.1: Maximale principiële spanning ballastbed en ondergrond met verbrede dwarsliggers

	$\sigma_1$ [kN/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_2$ [kN/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_3$ [kN/mm <sup>2</sup> ]
<b>Ballastbed</b>	$-2,073 * 10^{-2}$	$-3,793 * 10^{-3}$	$-2,053 * 10^{-2}$
<b>Ondergrond</b>	$-4,305 * 10^{-6}$	$-4,974 * 10^{-6}$	$-9,023 * 10^{-6}$

Om de invloed van de verbrede dwarsliggers op de spanningen in het ballastbed en de ondergrond in kaart te brengen, is het nodig om Tabel 6.1 te vergelijken met Tabel 4.1. De verschillen per onderdeel en per principiële spanning is hieronder weergegeven in Tabel 6.2. De plus staat hier voor een toename van de spanning in absolute zin ten opzichte van het basismodel en de min voor een afname.

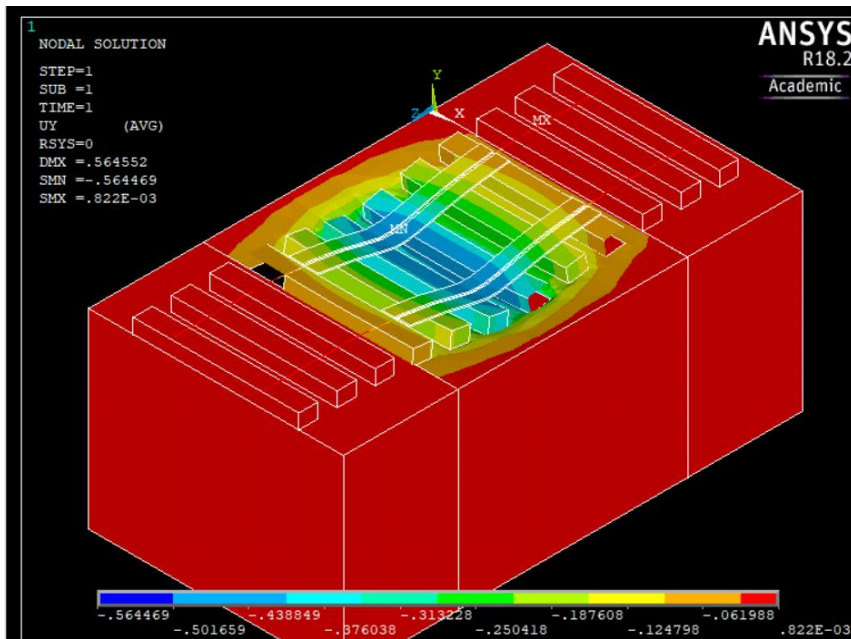
Tabel 6.2: Verschil in maximale principiële spanning met/zonder verbrede dwarsliggers

	$\sigma_1$ [kN/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_2$ [kN/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_3$ [kN/mm <sup>2</sup> ]
<b>Ballastbed</b>	$+3,9 * 10^{-4}$	$-8,68 * 10^{-4}$	$-9,05 * 10^{-3}$
<b>Ondergrond</b>	$-4,07 * 10^{-7}$	$+9,8 * 10^{-8}$	$-2,807 * 10^{-6}$

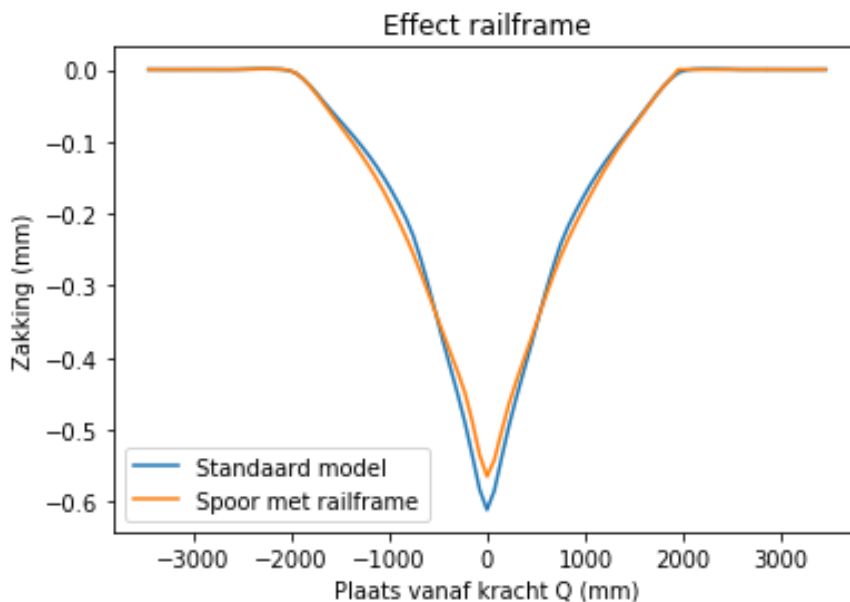
Uit Tabel 6.2 blijkt dat de maximale principiële spanning ten gevolge van de verbrede dwarsligger afneemt in het ballastbed en de ondergrond, uitgezonderd twee principiële spanningen. Dit komt overeen met de verandering van de zakking ten gevolge van de maatregel. Net als de zakking neemt namelijk ook de maximale spanning af in het ballastbed en de ondergrond. Voor  $\sigma_2$  van de ondergrond geldt dit echter niet. Hier wordt een kleine toename van de spanning geconstateerd. Ook  $\sigma_1$  van de ballastbed neemt toe als gevolg van de verbrede dwarsliggers.

## 6.2 Railframe

Door de toevoeging van de railframes zouden de zettingen verminderd moeten worden, omdat de elasticiteit van het spoor afneemt. De verplaatsingen in y-richting zijn in een contourplot weergegeven in Figuur 6.3. Vergeleken met Figuur 4.2 is op het eerste gezicht weinig verschil te zien. Dit verschil wordt duidelijker in Figuur 6.4 waar de zakkingen van de spoorstaaf met en zonder railframe zijn weergegeven. Zo valt op dat de maximale zakking van de spoorstaaf lager is bij de aanwezigheid van een railframe. Door de railframe wordt de belasting iets meer verspreid over de spoorstaaf getuige het iets minder steile verloop van de zakking. Een groter resultaat zou wellicht kunnen worden behaald door de dimensies van de railframes vergroten, bijvoorbeeld door ze langer te maken.



Figuur 6.3: Contourplot model met railframe



Figuur 6.4: Zakking model met/zonder railframe

Wat betreft de spanningen, worden deze op dezelfde manier vergeleken als bij de vorige maatregel. Om dit op kwantitatieve wijze te doen, zijn de maximale spanningen in absolute zin bepaald en weergegeven in Tabel 6.3. Het minteken is hier behouden om te laten zien dat het gaat om drukspanning of trekspanning.

Tabel 6.3: Maximale principiële spanning ballastbed en ondergrond met railframe

	$\sigma_1$ [kN/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_2$ [kN/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_3$ [kN/mm <sup>2</sup> ]
<b>Ballastbed</b>	$-2,341 * 10^{-2}$	$-4,058 * 10^{-3}$	$-2,186 * 10^{-2}$
<b>Ondergrond</b>	$-4,493 * 10^{-6}$	$-5,062 * 10^{-6}$	$-1,051 * 10^{-5}$

Om de vergelijking te kunnen maken, wordt gekeken naar het verschil in maximale principiële spanning met de railframe en zonder de railframe. Het resultaat hiervan is te zien in Tabel 6.4

Hierbij dient opnieuw te worden opgemerkt dat een plusteken staat voor een toename van de maximale spanning in absolute zin en een minteken voor een afname van de spanning.

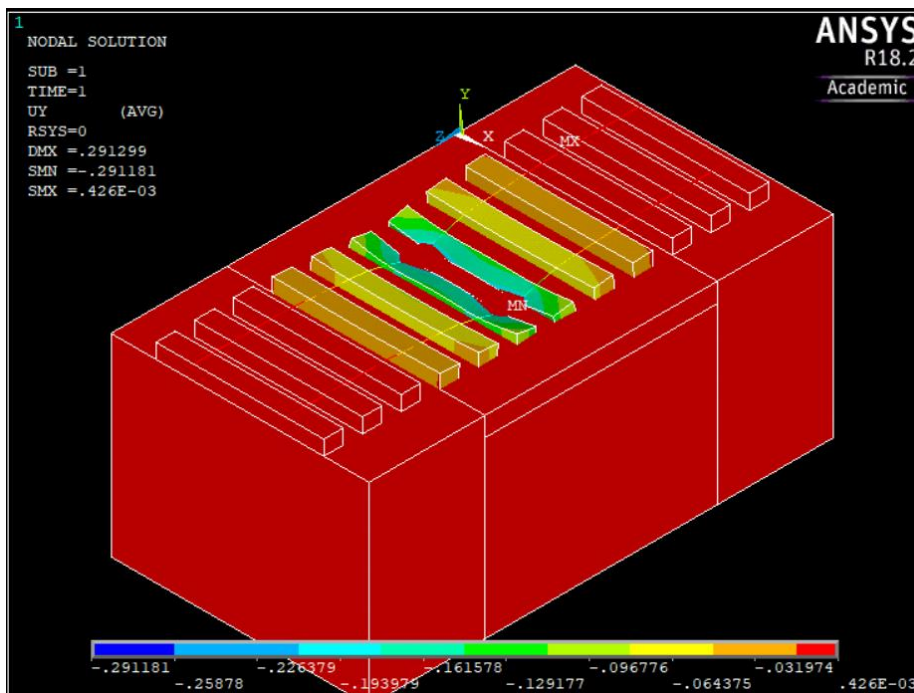
Tabel 6.4: Verschil in maximale principiële spanning met/zonder railframe

	$\sigma_1$ [kN/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_2$ [kN/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_3$ [kN/mm <sup>2</sup> ]
<b>Ballastbed</b>	$+3,07 * 10^{-3}$	$-6,03 * 10^{-4}$	$-7,72 * 10^{-3}$
<b>Ondergrond</b>	$-2,19 * 10^{-7}$	$-1,86 * 10^{-7}$	$-1,32 * 10^{-5}$

Uit Tabel 6.4 blijkt dat de railframe een positief effect heeft op de principiële spanningen in de ondergrond. Deze zijn namelijk kleiner dan zonder gebruik van railframes. Wat betreft het ballastbed gaat dit niet geheel op. Voor  $\sigma_1$  wordt de waarde namelijk hoger, terwijl  $\sigma_2$  en  $\sigma_3$  wel afnemen.

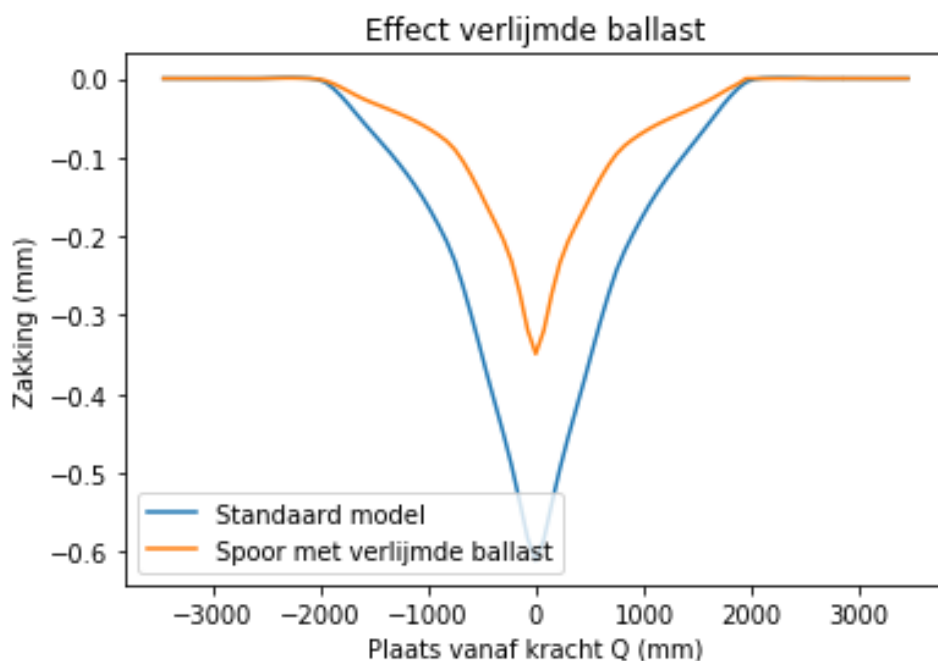
### 6.3 Verlijmde ballast

Doordat de stijfheid van de ballast groter wordt door het verlijmen, is de verwachting dat de zettingen kleiner worden doordat de ballast deze beter kunnen opvangen. In Figuur 6.5 en 6.6 is te zien dat dit inderdaad het geval is. De maximale zetting ter plaatse van de kracht Q is bijna met de helft afgenomen. Wat verder opvalt, is dat het gebied waar de kracht nog invloed heeft op de zettingen wel gelijk is gebleven. De totale zetting wordt dus kleiner, maar het gebied waarover deze zettingen plaatsvinden, verandert niet.



Figuur 6.5: Contourplot model met verlijmde ballast





Figuur 6.6: Zakking model met/zonder verlijmde ballast

Ten slotte wordt ook bij deze maatregel in kaart gebracht hoe de maximale potentiële spanningen veranderen. Juist bij deze maatregel is het interessant om te kijken hoe de spanningen in het ballastbed veranderen door deze ballast te verlijmen. De resultaten hiervan zijn weergegeven in Tabel 6.5.

Tabel 6.5: Maximale principiële spanning ballastbed en ondergrond met verlijmde ballast

	$\sigma_1$ [kN/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_2$ [kN/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_3$ [kN/mm <sup>2</sup> ]
<b>Ballastbed</b>	$-2,412 \cdot 10^{-2}$	$-4,619 \cdot 10^{-3}$	$-1,854 \cdot 10^{-2}$
<b>Ondergrond</b>	$-6,978 \cdot 10^{-6}$	$-7,565 \cdot 10^{-6}$	$-1,080 \cdot 10^{-5}$

Om ook inzicht te krijgen in het effect van het verlijmen van ballast op de spanningen in het ballastbed en de ondergrond, is in Tabel 6.6 het verschil in maximale principiële spanning met en zonder het verlijmen van ballast weergegeven.

Tabel 6.6: Verschil in maximale principiële spanning met/zonder verlijmde ballast

	$\sigma_1$ [kN/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_2$ [kN/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_3$ [kN/mm <sup>2</sup> ]
<b>Ballastbed</b>	$+3,78 \cdot 10^{-3}$	$-4,2 \cdot 10^{-5}$	$-1,104 \cdot 10^{-2}$
<b>Ondergrond</b>	$+2,266 \cdot 10^{-6}$	$+2,689 \cdot 10^{-6}$	$+6,97 \cdot 10^{-6}$

Uit Tabel 6.6 blijkt dat de maximale principiële spanning in alle drie hoofdrichtingen door de ballastverlijming toenemen in de ondergrond. Voor het ballastbed gaat dit echter niet op. Hier neemt alleen  $\sigma_1$  toe, terwijl in de twee andere richtingen de maximale principiële spanning wel kleiner wordt.

## 6.4 Overzicht maatregelen en resultaat

Als afsluiting van dit hoofdstuk wordt het effect op de zakkingen en de spanningen van de drie maatregelen zoals hiervoor beschreven in een overzicht weergegeven, zoals te zien is in Tabel 6.7 en 6.8. Hierin valt te zien dat alle maatregelen zorgen voor een reductie in de maximale zakking. Hierbij zorgen de verbrede dwarsliggers en de railframes voor een verbetering van enkele procenten. De verlijjnde ballast zorgt voor een veel sterkere reductie in de maximale zakking, maar liefst 38 procent.

Het is de vraag of deze reductie in werkelijkheid ook mogelijk is, met name bij het verlijjmen van ballast. Wat dit precies doet met de stijfheid van het ballastbed is niet bekend. Vandaar dat de gebruikte stijfheid in het aangepaste model een schatting is op basis van de extra weerstand die het ballastbed zou krijgen bij verlijjming ervan.

In de praktijk zou deze stijfheid lager uit kunnen vallen, waardoor ook de reductie van de maximale zakking in werkelijkheid kleiner zal zijn. Hiernaast kan ook tijdens de uitvoering een lager stijfheid ontstaan dan op basis van de theorie werd verwacht. Ook dit betekent dat de zakking minder wordt gereduceerd dan vooraf gedacht.

Tabel 6.7: Overzicht maatregelen en effect op de maximale zakking

Model	Maximale zakking (x=0) [mm]	Verbetering t.o.v. standaardmodel [%]
Standaardmodel	0,61086	-
Verbrede dwarsligger	0,59334	2,9
Railframe	0,56447	7,6
Verlijjnde ballast	0,37800	38,1

Tabel 6.8: Overzicht maatregelen en effect op de maximale principiële spanning

Model	Onderdeel	Verandering $\sigma_1$ t.o.v. standaardmodel [%]	Verandering $\sigma_2$ t.o.v. standaardmodel [%]	Verandering $\sigma_3$ t.o.v. standaardmodel [%]
Verbrede dwarsligger	Ballastbed	1,88	-22,88	-30,59
	Ondergrond	-8,64	2,01	-23,73
Railframe	Ballastbed	15,09	-12,94	-26,10
	Ondergrond	-4,65	-3,91	-111,58
Verlijjnde ballast	Ballastbed	18,58	-0,90	-37,32
	Ondergrond	48,09	55,15	58,92

Uit Tabel 6.8 blijkt dat het effect op de spanningen door de maatregelen niet eenduidig te noemen zijn. Er kan echter wel worden gezegd dat de verbrede dwarsliggers zorgen voor een afname van de spanningen of zeer kleine toename hiervan. Ook bij de railframes worden de spanningen hoofdzakelijk kleiner. Alleen  $\sigma_1$  in het ballastbed neemt toe als gevolg van de toepassing van railframes. Het verlijjmen van ballast heeft vooral een negatief effect op de spanningen. Zo nemen alle spanningen in de ondergrond toe als gevolg van de ballastverlijjming. Voor het ballastbed reageren de principiële spanningen verschillend. Zo neemt  $\sigma_1$  toe, blijft  $\sigma_2$  gelijk en neemt  $\sigma_3$  af.

## 7. DISCUSSIE

In dit rapport is onderzoek gedaan naar de responsies in een transitiezone. De vraag is in hoeverre deze responsies uit het model overeenkomen met de werkelijke responsies in een transitiezone. Om het Ansysmodel te kunnen valideren, is in het rapport reeds een vergelijking gedaan met de analytische methode van Zimmerman. Op basis van deze vergelijking lijkt het model de transitiezone goed te beschrijven. Om het model verder te kunnen ontwikkelen, zou het een mogelijkheid zijn om de uitkomsten te vergelijken met testen die in het veld zijn gedaan.

Verder zou de parameter spanning kunnen worden uitgebreid. In dit rapport is slechts gekeken naar maximale principiële spanning en het effect hierop bij het implementeren van de diverse maatregelen. Het is wellicht interessant zijn om inzicht te krijgen in het spanningsverloop in het ballastbed en de ondergrond om zo de responsies nog beter te kunnen begrijpen.

Ook zonder deze vergelijking kunnen er al enkele beperkingen en verbeteringen worden gesteld aan het gecreëerde model. Zo is de lengte van de transitiezone relatief kort. Het volume in het model dat de transitiezone voorstelt, is 3600 mm lang. Omwille van deze beperkte lengte is het lastig om binnenin de transitiezone verschillende responsies op te merken.

Wel is het model geschikt om het verschil in het verloop van de zettingen tussen de transitiezone en het civiel kunstwerk in kaart te brengen. De belangrijkste parameters zijn in het model verwerkt, hoewel ook enkele onderdelen van het spoor ontbreken. Zo zijn het railbevestigingssysteem en de rail pads niet gemodelleerd in het model. Hiervoor is gekozen om het model niet te geavanceerd te maken, omdat het model is bedoeld om een algemeen inzicht te bieden in de responsies van een transitiezone. Om hier een gedetailleerder beeld van te krijgen, is het mogelijk om in een vervolgonderzoek een meer gespecificeerd model te creëren waarin de railbevestiging en de rail pads wel worden meegenomen.

Een ander interessant punt is om te beoordelen hoe realistisch de voorgestelde maatregelen in het model zijn geïmplementeerd. De verbrede dwarsligger en het toevoegen van de railframes zijn realistisch gemodelleerd en de gebruikte afmetingen zijn vergelijkbaar met de praktijk. Wat betreft de maatregel om de ballast te verlijmen, lijken de behaalde resultaten minder snel in de praktijk gehaald te kunnen worden. Wellicht kunnen delen van het ballastbed wel de extra stijfheid aannemen zoals gemodelleerd, maar het is onrealistisch dat over de gehele 30 cm diepte, waar de ballastverlijming is geïmplementeerd de stijfheid met die factor is toegenomen zoals is gemodelleerd. In werkelijkheid zal de hoeveelheid reductie die met deze maatregel wordt behaald, naar alle waarschijnlijkheid lager uitvallen dan hier is gemodelleerd. In een mogelijk vervolgonderzoek kan deze parameter gedetailleerder worden gespecificeerd om uitkomsten te genereren die waarschijnlijk beter met de praktijk overeenkomen.

Een andere mogelijkheid tot vervolgonderzoek is om in kaart te brengen hoe gevoelig de resultaten zijn met betrekking tot de parameters in de maatregelen. Welke invloed heeft bijvoorbeeld de lengte van een railframe of de extra breedte van een dwarsligger op de reductie van de maximale zakking? In een vervolgstudie kan men op zoek gaan naar het

onderlinge verband tussen deze twee grootheden. Zo zou in beeld kunnen worden gebracht of het nut heeft om de dimensies te vergroten om daarmee de maximale zakking in een transitiezone tegen te gaan of dat met een beperkte lengte al veel resultaat kan worden behaald en de maatregelen met relatief kleine dimensies kan worden uitgevoerd.

## 8. CONCLUSIE

In dit rapport is onderzoek gedaan naar de responsies in een transitiezone. Met behulp van een programma dat gebruikmaakt van de eindige-elementenmethode is getracht om inzicht te krijgen in deze responsies en hoe deze kunnen worden beïnvloed door het nemen van maatregelen.

Voordat de effecten van het Ansysmodel konden worden waargenomen, is het gecreëerde model eerst vergeleken met een analytische methode. Hieruit blijkt dat de zettingen in verticale richting voor het spoor in de transitiezone in grote mate overeenkomen met het Zimmermanmodel. De maximale verzakking verschilt 0,051 mm en verder volgen de twee lijnen grotendeels elkaars verloop en na ongeveer 2000 mm is de zakking nagenoeg nul.

De grootste verschillen zijn te zien ter plaatse van de directe overgang van de transitiezone en het civiel kunstwerk. Bij het Zimmermanmodel vindt enige overcompensatie plaats, waardoor er sprake is van verplaatsing van de spoorstaaf in positieve y-richting. In het model is deze overcompensatie niet te zien, omdat de stijfheid van het civiel kunstwerk zodanig hoger is dan de stijfheid van de transitiezone dat het civiel kunstwerk de zakking van de spoorstaaf direct dempt.

Omdat het Ansysmodel goed overeenkomt met het Zimmermanmodel is het mogelijk om het model te gebruiken om het effect van de maatregelen te meten. De reductie in de zakking bij de drie gekozen maatregelen zijn verschillend, maar alle lijken nut te hebben om de zakkingen van de spoorstaaf te verminderen.

De verbrede dwarsliggers zorgen hierbij voor de kleinste reductie in maximale zakking. Wel is te zien dat het geleidelijk laten oplopen van de dwarsliggerbreedte en daarmee de stijfheid, effect heeft op de zakkingen. Dicht bij de overgang naar het civiel kunstwerk, waar de dwarsliggerbreedte hoger is, zijn de zakkingen meer afgenomen dan waar de breedte van de dwarsligger minder hoog is.

Het aanleggen van railframes ter plaatse van de transitiezone laat al meer effect zien. De railframes geven de mogelijkheid om de belasting meer te spreiden en zorgen voor een hogere stijfheid van het spoor. De zakking van de spoorstaaf is daarmee minder dan zonder toepassing van een railframe. Door zowel aan de binnen- als de buitenkant van de spoorstaaf railframes toe te voegen, wordt er maximale reductie bereikt.

Het verlijmen van de ballast heeft op basis van dit onderzoek het meeste effect op de zakkingen van de spoorstaaf. Deze maatregel geeft het ballastbed een hogere stijfheid, waardoor de belasting beter kan worden opgenomen. Door de ballast onder de transitiezone een hogere stijfheid toe te kennen, neemt de maximale zakking van de spoorstaaf met bijna de helft af.

Wat verder nog opgemerkt dient te worden, is het feit dat de drie genoemde maatregelen geen invloed hebben op het gedeelte van de spoorstaaf waar de belasting nog invloed heeft op de zakking. Dit wil dus zeggen dat de maatregelen uitsluitend effect hebben op de maximale zakking, en niet op de lengte van het spoor waar deze zakking invloed heeft.

Wat betreft de verandering in spanningen in het ballastbed en ondergrond is niet een eenduidig resultaat gevonden. Wat wel opvalt, is dat de spanningen in de ondergrond als gevolg van de ballastverlijming in alle hoofdrichtingen toeneemt wat mogelijk voor falen kan zorgen. In het ballastbed zelf reageren de spanningen verschillend afhankelijk van hun hoofdrichting. Bij de verbrede dwarsliggers en de railframes wordt hoofdzakelijk een reductie van de maximale spanning waargenomen. Deze twee maatregelen lijken op basis hiervan een betere keuze dan het verlijmen van ballast om te hoge spanningen in het ballastbed en de ondergrond te voorkomen.

## BIBLIOGRAFIE

- Gallage, C., Dareeju, B., & Dhanasekar, S. (2013). State-of-the-art : track degradation at bridge transitions. *Proceedings of the 4th International Conference on Structural Engineering and Construction Management, 2013*, 40-52.
- Giannakos, K., & Tsoukantas, S. (2012). Transition Zone between Ballastless and Ballasted Track: Influence of changing stiffness on acting forces. *Procedia – Social and Behavioral Sciences, 48*, 3548-3557.
- Hartsuijker, C. (2016). *Mechancia: spanningen, vervormingen, verplaatsingen* (2<sup>e</sup> ed.). Amsterdam: Boom uitgevers.
- Kuipers, E.R. (1997). *Gegevens bovenbouw en ballastbed* (L400). Opgehaald van COB website: <https://www.cob.nl/wp-content/uploads/2018/01/L40011.pdf>
- Li, D., & Davis, D. (2005). Transition of Railroad Bridge Approaches. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 131(11), 1392-1398. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:11(1392)
- Prakoso, P.B. (2012). The Basic Concepts of Modelling Railway Track Systems using Conventional and Finite Element Methods. *Info Teknik, 13*(1), 57-65. Opgehaald van Neliti website: <https://media.neliti.com/media/publications/66250-EN-the-basic-concepts-of-modelling-railway.pdf>
- ProRail (2010). *Constructieve maatregelen ter voorkoming van ontoelaatbare zakkings van het spoor* (Handboek 00017). Opgehaald van Brightspace website: [https://brightspace.tudelft.nl/content/enforced/193791-CT3255-19+2019+1/HDB00017-V001.pdf?\\_&d2lSessionVal=62Xk3GIndffo7YkUTkoDn6PNI&ou=193791](https://brightspace.tudelft.nl/content/enforced/193791-CT3255-19+2019+1/HDB00017-V001.pdf?_&d2lSessionVal=62Xk3GIndffo7YkUTkoDn6PNI&ou=193791)
- Steenbergen, M.J.M.M., De Jong, E., & Zoeteman, A. (2015). Dynamic Axle Loads as a Main Source of Railway Track Degradation. *Geotechnical Safety and Risk V*, 243-240. doi:10.3233/978-1-61499-580-7-243
- Wang, H., Markine, V.L., Shevtsov, I.Y., & Dollevoet, R. (2015). Analysis of the dynamic behaviour of a railway track in transition zones with differential settlement. *Proceedings of the 2015 Joint Rail Conference, 2015*, 1-7.
- Zuada Coelho, B. E. (2011). *Dynamics of railway transition zones in soft soils*. Opgehaald op 24 april 2020, van: <https://www.deltares.nl/publication/dynamics-railway-transition-zones-soft-soils/>
- Figuur voorpagina: Kim, S. (nd). Grijs metalen spoorweg [Foto]. Opgehaald op 24 april 2020 van: <https://unsplash.com/photos/eqCfMZmysK4>

Figuur 2.1: Wang, H. (2018). Ontwikkeling transitiezone [Afbeelding]. Opgehaald op 19 mei 2020 van: [https://pure.tudelft.nl/portal/files/40074494/sensors\\_18\\_00413.pdf](https://pure.tudelft.nl/portal/files/40074494/sensors_18_00413.pdf)

Figuur 3.1: Markine, V.L. (2019). Opstelling transitiezone TU Delft [Foto]. Opgehaald op 28 mei 2020 van: <https://brightspace.tudelft.nl/d2l/le/content/193791/viewContent/1363213/View>

Figuur 5.1: ProRail (2010). Railframe [Foto]. Opgehaald op 7 juni 2020 van: [https://brightspace.tudelft.nl/content/enforced/193791-CT3255-19+2019+1/HDB00017-V001.pdf?\\_&d2lSessionVal=62Xk3GIndffo7YkUTkoDn6PNI&ou=193791](https://brightspace.tudelft.nl/content/enforced/193791-CT3255-19+2019+1/HDB00017-V001.pdf?_&d2lSessionVal=62Xk3GIndffo7YkUTkoDn6PNI&ou=193791)