

DEKRA Rail

Ontsporinganalyse Laan van Maarschalkerweerd

30 april 2021




Ontsporinganalyse Laan van Maarschalkerweerd

Opdrachtgever : Provincie Utrecht, domein Mobiliteit, dhr. R. de Zutter
Adres : Archimedeslaan 6
: 3584 BA Utrecht

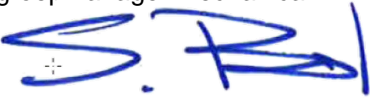
Uw kenmerk : Opdracht documentnr. 82236357, verplichtingennr. 4100037271

Ons kenmerk : DR/21/210142/002

Auteur(s) : Mark Linders 

Onderzoek : Martin Hiensch, Ladislav van Rijen, Mark Linders

Referent : Martin Hiensch 

Vrijgave : Saskia Bol, Vakgroepmanager Mechanica 

Datum : 30 april 2021

Versie : 1.0 definitief

Managementsamenvatting

Op 16 maart 2021 vond een aanrijding plaats tussen een CAF sneltram en een bestelwagen op de Laan van Maarschalkerweerd. In opdracht van Provincie Utrecht heeft DEKRA Rail een analyse uitgevoerd van deze ontsporing aan de hand van videobeelden, inspecties en voertuigbaansimulaties.

Voor de analyse zijn vier onderzoeksvragen geformuleerd. Op grond van de resultaten van de analyse kunnen deze onderzoeksvragen als volgt worden beantwoord.

1. Wat kan op basis van de videobeelden van de ontsporing, de sporen op de ontsporinglocatie, de sporen op de tram en aanvullende informatie van Provincie Utrecht worden gezegd over het begin van de ontsporing?

Antwoord: Uit de videobeelden volgt dat de tram eerst aan de rechter voorzijde van de kop contact heeft gemaakt met de zijkant van de bestelwagen. Dit heeft geleid tot ontsporing van het voorste loopwerk van de tram naar de binnenzijde van de boog.

2. Wat moet ongeveer het verloop van de aanrijdkracht zijn geweest tussen de tram en de bestelwagen?

Antwoord: De gemiddelde aanrijdkracht moet circa 70 kN zijn geweest over een tijdsduur van 119 tot 179 ms.

3. Kan met de antwoorden op bovenstaande vragen de ontsporing in een simulatie worden gereconstrueerd?

Antwoord: Ja, de ontsporing is succesvol gereconstrueerd.

4. Welke voertuigparameters van de ontspoorde tram hebben een rol gespeeld bij de ontsporing en hoe verhouden deze voertuigparameters zich tot die van andere lagevloertrams?

Antwoord: Uit de simulatieresultaten volgt dat de positie van het aangrijpingspunt van de aanrijdkracht bepalend is geweest voor het ontsporen. Tussen de voertuigparameters van de onderzochte lagevloertrams zijn geen significante verschillen gevonden die zouden kunnen leiden tot een groter risico op ontsporing voor de Utrechtse CAF-tram.

De analyse heeft geleid tot de volgende conclusies.

- De simulatieresultaten bevestigen dat de ontsporing het gevolg is van een samenloop van omstandigheden. Het gewicht van de aangereden bestelwagen en het gegeven dat deze door de kop van de tram is aangereden hebben ertoe geleid dat de tram is ontspoord. Uit de simulatieresultaten volgt dat de tram niet zou zijn ontspoord bij een aanrijding met een lichter wegvoertuig of op een ander deel van de tram, dicht bij het loopwerk.
- Uit de simulatieresultaten volgt verder dat andere tramtypen in dezelfde situatie ook zouden ontsporen. Volgens de simulatieresultaten is de CAF-tram niet gevoeliger voor ontsporingen dan de andere beschouwde lagevloertrams. Hoewel dit niet uit de simulatieresultaten is gebleken, wordt de ontsporingveiligheid van de CAF-tram gunstig beïnvloed door de hoogte van de wielflenzen, die bij de CAF-tram groter is dan bij de andere beschouwde lagevloertrams.

Inhoudsopgave

Managementsamenvatting	2
Inhoudsopgave	3
1 Inleiding	4
2 Vraagstelling	4
3 Methode	4
4 Onderzoeksresultaten en bevindingen	5
4.1 Gegevens Provincie Utrecht	5
4.2 Bevindingen ontsporingslocatie	5
4.3 Resultaten analyse videobeelden	7
4.4 Verloop van de aanrijdkracht	7
4.5 Resultaten inspectie ontspoorde tram	8
4.6 Aangrijpingspunt van de aanrijdkracht	10
4.7 Beschouwing voertuigparameters	10
4.8 Resultaten voertuig-baansimulaties	11
4.9 Beantwoording van de onderzoeksvragen	13
5 Conclusie	14

1 Inleiding

Op 16 maart 2021 vond een aanrijding plaats tussen een CAF sneltram en een bestelwagen op de Laan van Maarschalkerweerd. Als gevolg van deze aanrijding ontspoorde de tram, wat resulteerde in grote materiele schade. In opdracht van Provincie Utrecht heeft DEKRA Rail een analyse uitgevoerd van deze aanrijding met ontsporing tot gevolg aan de hand van videobeelden, inspecties en voertuig-baansimulaties.

De ontsporingsanalyse geeft antwoord op de vraag op welke wijze de aanrijding geleid heeft tot de ontsporing. Daarnaast biedt de analyse inzicht op de gevoeligheid voor ontsporing van het CAF voertuigontwerp en/of de wiel-railcombinatie.

De onderzoeksvragen zijn beschreven in hoofdstuk 2 van dit rapport, gevolgd door een overzicht van de onderzoeksopzet in hoofdstuk 3. De onderzoeksresultaten zijn opgenomen in hoofdstuk 4. In hoofdstuk 5 worden de conclusies van het onderzoek samengevat.

2 Vraagstelling

De ontsporingsanalyse dient ter beantwoording van de volgende vragen.

- Op welke wijze heeft de aanrijding met de bestelwagen geleid tot de ontsporing?
- Wat is de gevoeligheid voor ontsporing van het CAF voertuigontwerp en/of de wiel-railcombinatie?

Om deze vragen te beantwoorden zijn de volgende onderzoeksvragen geformuleerd.

1. Wat kan op basis van de videobeelden van de ontsporing, de sporen op de ontsporingslocatie, de sporen op de tram en aanvullende informatie van Provincie Utrecht worden gezegd over het begin van de ontsporing?
2. Wat moet ongeveer het verloop van de aanrijdkracht zijn geweest tussen de tram en de bestelwagen?
3. Kan met de antwoorden op bovenstaande vragen de ontsporing in een simulatie worden gereconstrueerd?
4. Welke voertuigparameters van de ontspoorde tram hebben een rol gespeeld bij de ontsporing en hoe verhouden deze voertuigparameters zich tot die van andere lagevloertrams?

3 Methode

Voor de beantwoording van de onderzoeksvragen zijn de volgende stappen doorlopen.

1. Inspectie van de ontsporingslocatie;
2. Analyse van de videobeelden;
3. Bepaling van het verloop van de aanrijdkracht tussen de bestelwagen en de tram op basis van de videobeelden;
4. Inspectie van het ontspoorde voertuig;

5. Beoordeling van de voertuigparameters die van invloed kunnen zijn op het ontsporingsrisico, inclusief een vergelijking van deze parameters met andere soortgelijke voertuigtypen;
6. Opzet en uitvoering van voertuig-baansimulaties van de ontsporing met het geschatte verloop van de aanrijdkracht tussen de tram en de bestelwagen.
7. Analyse van de simulatieresultaten.

4 Onderzoekresultaten en bevindingen

4.1 Gegevens Provincie Utrecht

Ter voorbereiding van het onderzoek heeft Provincie Utrecht documentatie en aanvullende informatie aangeleverd. Op basis van deze informatie is het volgende vastgesteld.

- De snelheid van de tram bedroeg op het moment van de aanrijding circa 35 km/h.
- De wielen van de tram waren voorzien van het TTK1-wielprofiel. Dit profiel was zo goed als ongesleten.
- Het tramspoor waarop de ontsporing heeft plaatsgevonden ligt ter plaatse van de overweg in een horizontale boog met een boogstraal van 151,982 m en een verkanting van circa 30 mm.
- Het hier toegepaste railprofiel is 59E2.

4.2 Bevindingen ontsporingslocatie

Op Foto 1 is de situatie op de ontsporingslocatie kort na de ontsporing zichtbaar. In het wegdek zijn de sporen van de wielen onder de vooroplopende rijtuigbak. De loopwerken onder de eerste en derde rijtuigbak van het voorste tramstel zijn naar de binnenzijde van de boog ontspoord. De loopwerken onder de achterste rijtuigbak van het voorste tramstel en onder de eerste rijtuigbak van het tweede tramstel zijn naar de buitenzijde van de boog ontspoord.



Foto 1: Drone-opname van de situatie kort na de ontsporing. In het wegdek zijn de sporen van de wielen onder de eerste rijtuigbak zichtbaar. (Bron: NU.nl).

Op de overweg maken de tramsporen een hoek van ongeveer 25 graden met de rijbaan waarop de ontsporing heeft plaatsgevonden.

Op 24 maart is de ontsporingslocatie bezocht. Hierbij is het volgende vastgesteld.

Uit de sporen in het wegdek volgt dat de vooroplopende wielen van de tram uit de groeven van het spoor moeten zijn gelopen op de posities die zijn aangegeven in Foto 2. Het rechter wiel bevond zich op dat moment kort voor de doorgetrokken witte lijn aan de linkerzijde van de rijbaan waarop de bestelwagen reed.

Aan de rechterzijde van de rijbaan (in rijrichting gezien) bevat de trottoirband beschadigingen. Deze beschadigingen bevinden zich in het verlengde van de sporen in het wegdek van tramwielen die naar de buitenzijde van de boog zijn ontspoord. Zie Foto 3.



Foto 2: Ontsporinglocatie, gezien vanaf de rechterzijde (in rijrichting gezien).



Foto 3: Beschadigingen in de trottoirband (in rijrichting gezien aan de rechterzijde van de ontsporingslocatie).

4.3 Resultaten analyse videobeelden

Op basis van de door Provincie Utrecht aangeleverde videobeelden van de overweg is het volgende vastgesteld.

1. Direct voor de aanrijding is de snelheid van de bestelwagen ongeveer gelijk aan de component van de snelheid van de tram in de rijrichting van de bestelwagen. Dit moet circa $35 \times \cos 25^\circ = 32$ km/h zijn geweest.
2. De videobeelden bevestigen de gevonden positie van het ontsporingspunt: Op de beelden is te zien dat de tramwielen zich op het moment van de aanrijding op het rode gedeelte van het wegdek bevinden.
3. Op de beelden is ook te zien dat de voorste rytuigbak van de tram van richting verandert (ontspoort) voordat de wielen van de bestelwagen de stoeprand raken.
4. Aan het einde van de eerste fase van de ontsporing beweegt de bestelwagen zich in dezelfde richting als de tram, met dezelfde snelheid, en zijn de voorste wielen van de tram ontspoord. De tijdsduur van deze eerste fase moet circa 119 tot 179 ms zijn geweest. Gedurende dit tijdsinterval is de bestelwagen circa 0.42 m opzij verplaatst.
5. Op het moment van de aanrijding is het wegdek nat.

Daarnaast heeft Provincie Utrecht videobeelden getoond van de camera's in en op de ontspoorde tram. Uit deze videobeelden volgt dat de tram eerst aan de rechter voorzijde contact heeft gemaakt met de zijkant van de bestelwagen. Tijdens het verdere verloop van de ontsporing heeft de bestelwagen de tram meerdere keren aan de zijkant geraakt. Uiteindelijk is de linker achterhoek van de bestelwagen tegen de tweede deurpartij rechts van de tweede rytuigbak terechtgekomen.

Op de videobeelden van de tram is ook zichtbaar dat de tram na de ontsporing aan de rechter voorzijde een bovenleidingmast heeft aangereeden.

4.4 Verloop van de aanrijdkracht

Uit de videobeelden van de overweg volgt dat gedurende de eerste fase van de aanrijding tussen de tram en de bestelwagen een aanrijdkracht is opgetreden die loodrecht gericht was op de oorspronkelijke rijrichting van de bestelwagen.

Uitgaande van de bevindingen uit de videobeelden is de gemiddelde aanrijdkracht berekend die moet zijn opgetreden in een tijdsinterval van 143 ms, gebruikmakend van de wet van behoud van impuls. Hierbij zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd.

- De massa van de bestelwagen bedroeg 2000 tot 3000 kg.
- De wrijvingscoëfficiënt tussen de wielbanden van de bestelwagen en het natte wegdek was ongeveer gelijk aan 0.5 (waarde gebaseerd op https://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html).

Uit deze uitgangspunten volgt dat de wrijvingskracht tussen de wielbanden van de bestelwagen en het natte wegdek gelijk moet zijn geweest aan 10 tot 15 kN.

Uit de berekeningen is gebleken dat de aanrijdkracht 50 tot 100 kN moet zijn geweest. Uitgaande van een massa van de bestelbus van 2500 kg bedraagt de berekende aanrijdkracht 70 kN.

4.5 Resultaten inspectie ontspoorde tram

Op 31 maart is de ontspoorde tram visueel geïnspecteerd. Hierbij is het volgende aangetroffen.

1. Op de rechter zijkant van de tram zijn sporen zichtbaar van meerdere keren contact met de bestelwagen; zie Foto 4.
2. Op de kop van de tram is de rechter raamstijl beschadigd.
3. Onder de reflector op de rechterzijde van de kop bevindt zich in het vezelversterkte materiaal een scheur met een zigzaggend verloop; zie Foto 5. De vorm van deze scheur komt overeen met de contouren van de staalconstructie in de kop; zie Foto 6. De scheur eindigt aan de voorzijde van de kop bij de antiklimplaat die zich in de kop bevindt. (Deze is niet zichtbaar op Foto 6.)
4. In de scheur bevindt zich een stuk geel reflecterend materiaal, dat overeenkomt met de gele reflecterende rand op de bak van de bestelwagen. Om dit reflecterende materiaal zit een bevestigingsbeugel van de kop van de tram gevouwen; zie Foto 5.



Foto 4: Ontspoorde tram.

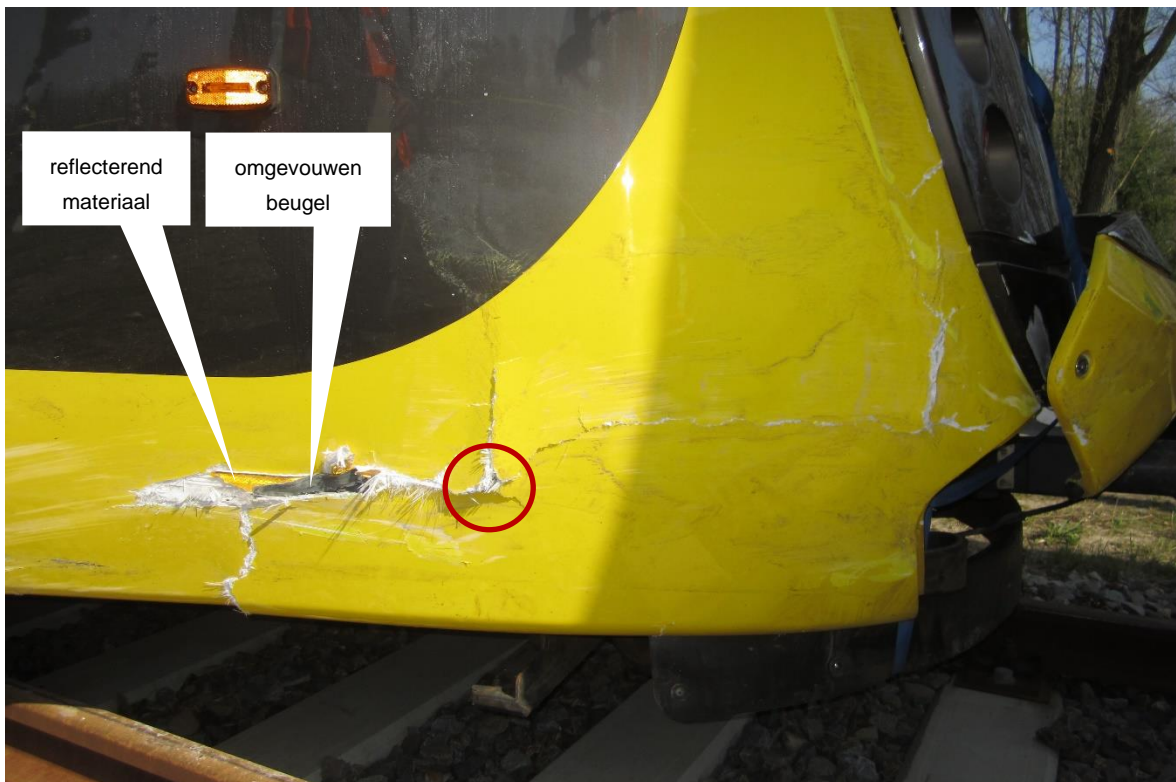


Foto 5: Detail van de kop van de ontspoorde tram met de sporen van de aanrijding.

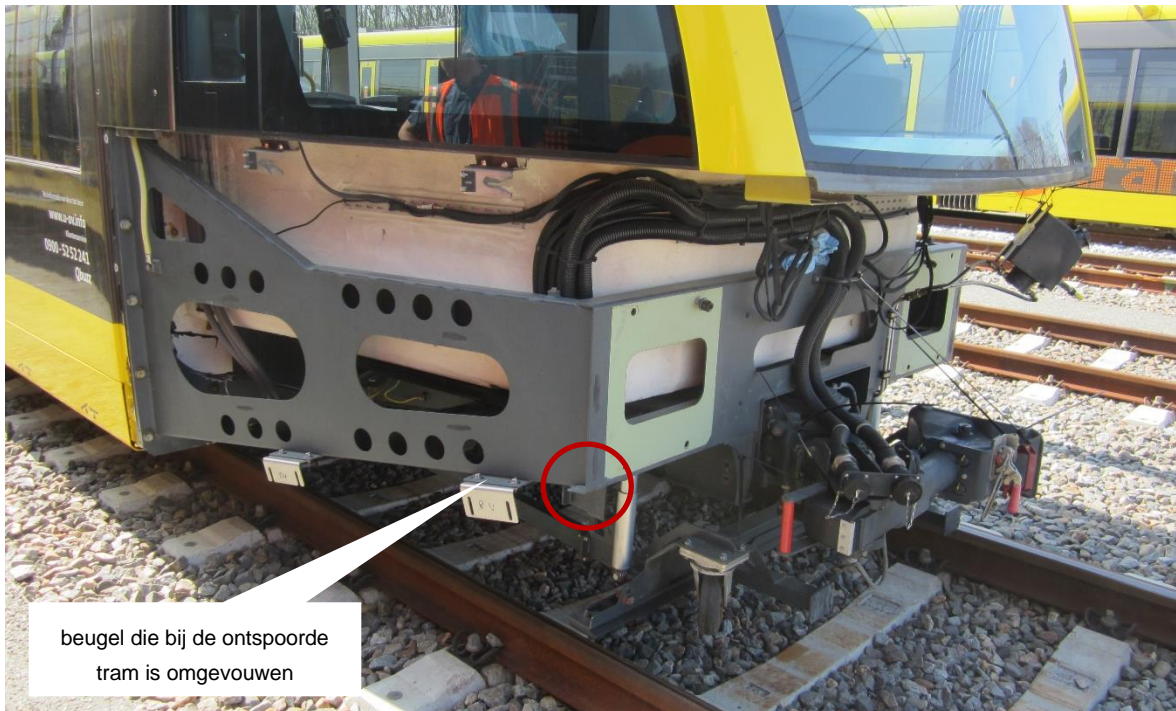


Foto 6: Deels gedemonteerde kop van een tram van hetzelfde type als de ontspoorde tram. De twee vervormingselementen met antiklimpaat die zich normaliter aan de voorzijde van de tram bevinden, ontbreken hier. De positie van het rood omcirkelde punt van de staalconstructie komt overeen met de positie van het rood omcirkelde punt op de vorige foto.

4.6 Aangrijpingspunt van de aanrijdkracht

De zijkant van de staalconstructie in de kop van de CAF-tram maakt een hoek van 10 graden ten opzichte van de lengteas van de tram. Deze hoek is kleiner dan de hoek tussen de rijbaan en het tramspoor op de overweg, die circa 25 graden bedraagt. Op grond van dit gegeven in combinatie met de videobeelden en de aangetroffen sporen op de tram is het aannemelijk dat de aanrijdkracht tijdens de eerste fase van de ontsporing aangreep op de rood omcirkelde positie in Foto 5. Dit punt bevindt zich bij de onbeschadigde tram 4420 mm voor het hart van het loopwerk en circa 490 mm boven BS.

4.7 Beschouwing voertuigparameters

In onderstaande tabel zijn de voertuigparameters van de CAF-tram opgenomen die relevant zijn voor de ontsporing op de Laan van Maarschalkerweerd. Daarnaast zijn de corresponderende voertuigparameters opgenomen van twee andere lagevloertrams: de Amsterdamse Combino en de Rotterdamse Citadis. De waarden in deze tabel zijn ontleend aan overzichtstekeningen van de trams en aan de voertuigmodellen die van deze trams zijn gemaakt. Ook is in de tabel per tramtype de verwachte positie van de aanrijdkracht aangegeven bij een aanrijding tegen de kop van de tram op de ontsporinglocatie op de Laan van Maarschalkerweerd.

		CAF-tram Utrecht	Amsterdamse tram	Rotterdamse tram
Lengte voorste rijtuigbak	[mm]	7.488	5.993	7.411
Afstand hart loopwerk-voorzijde kop	[mm]	5.238	3.973	5.116
<i>Afstand hart loopwerk-positie aanrijdkracht</i>	<i>[mm]</i>	<i>4.420</i>	<i>3.550</i>	<i>4.775</i>
Afstand hart loopwerk-zwaartepunt voorste rijtuigbak	[mm]	1.237	0.773	1.220
Massa voorste rijtuigbak	[t]	6.676	6.429	7.558
Massa voorste loopwerk	[t]	4.860	3.310	5.115
Nominale wieldiameter	[mm]	610	600	610
Nominale flenshoogte	[mm]	26	22	21

Tabel 1: Overzicht voertuigparameters.

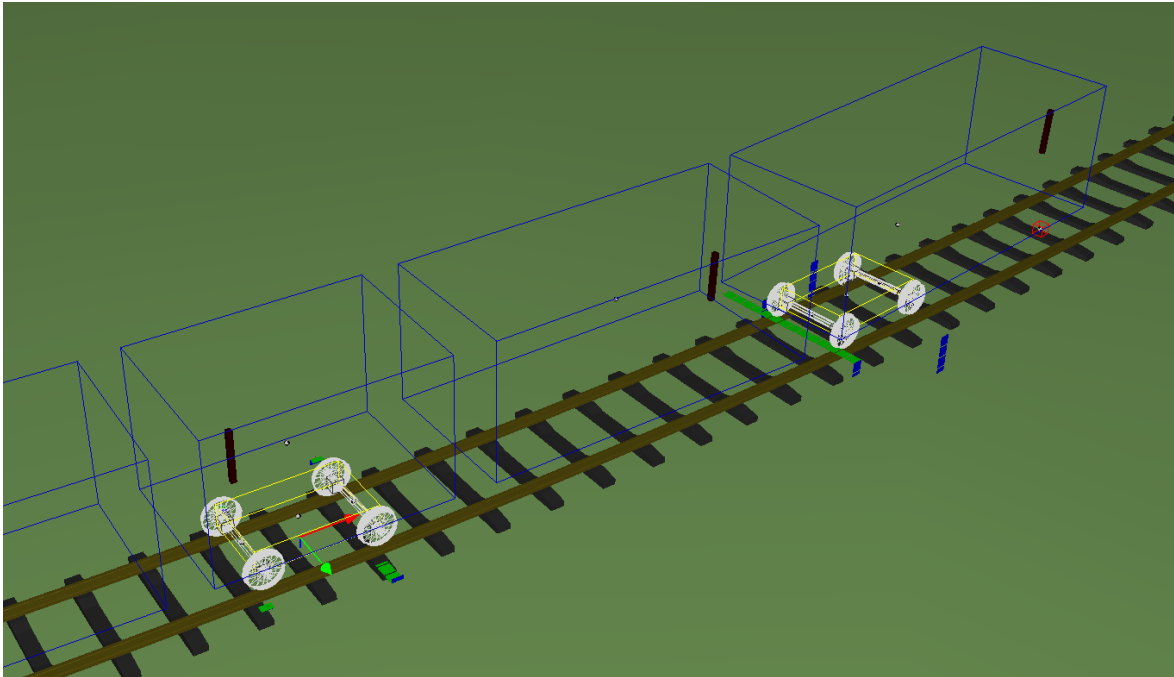
Uit een vergelijking van de voertuigparameters in Tabel 1 volgt:

1. De vooroplopende rijtuigbak steekt bij de Amsterdamse tram minder ver voor het loopwerk uit dan bij de andere tramtypen. Dit heeft naar verwachting een gunstig effect op de ontsporingsveiligheid van de Amsterdamse tram.
2. De Rotterdamse tram is zwaarder dan de andere tramtypen. Dit heeft naar verwachting een gunstig effect op de ontsporingsveiligheid van de Rotterdamse tram.
3. Alle hier beschouwde tramtypen hebben ongeveer dezelfde wieldiameters.
4. De Amsterdamse en Rotterdamse trams hebben kleinere nominale flenshoogtes dan de Utrechtse CAF-tram. Dit heeft naar verwachting een ongunstig effect op de ontsporingsveiligheid van de Amsterdamse en Rotterdamse trams.

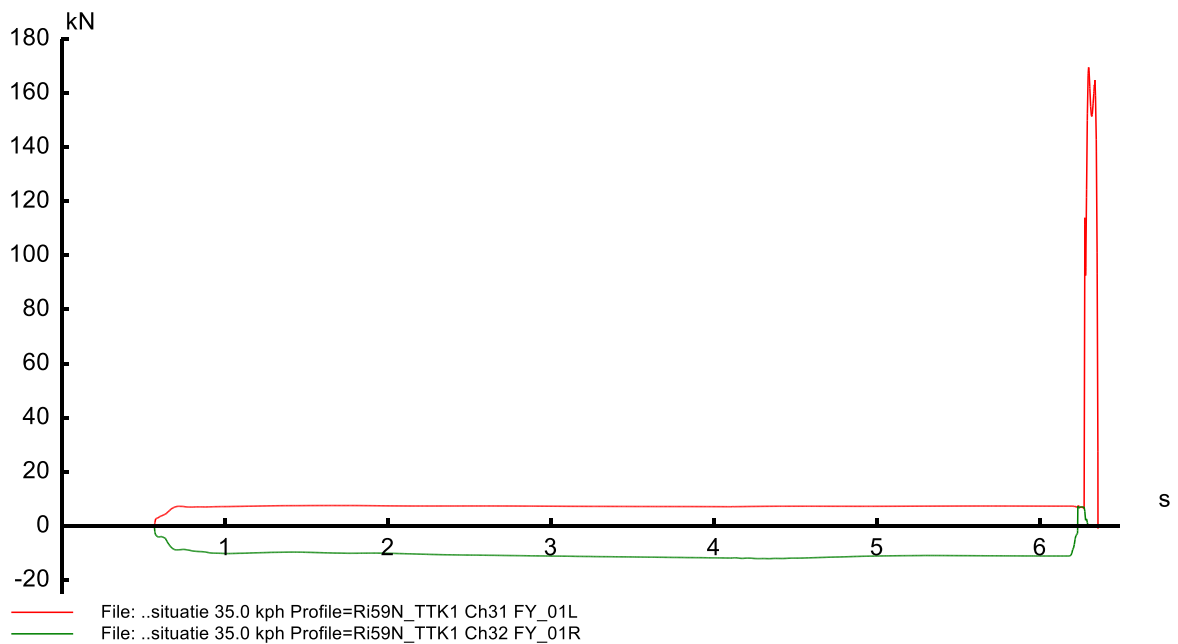
4.8 Resultaten voertuig-baansimulaties

De aanrijding van de CAF-tram op de Laan van Maarschalkerweerd is gereconstrueerd in een voertuig-baansimulatie met behulp van het softwarepakket VAMPIRE Pro, versie 6.60. Hierbij is gebruik gemaakt van het voertuigmodel van een lege tram dat door CAF is geleverd. Omdat de spoorstaven tijdens de ontsporing nat waren, is voor de wrijvingscoëfficiënt in het wiel-railcontact de waarde 0.20 aangehouden. De aanrijdkracht is gemodelleerd als een constante zijdelingse kracht van 70 kN gedurende 143 ms vanaf het tijdstip $t = 6.17$ s.

Net als in werkelijkheid is de tram in de simulatie ontspoord. De ontspoorde tram in de simulatie is weergegeven in Figuur 1. Het verloop van de zijdelingse krachten tussen het spoor en het vooroplopende wielstel van de tram volgens de simulatie is weergegeven in Figuur 2.



Figuur 1: Beeld van de simulatie van de ontsporing van de CAF-tram. Het voorlopende wielstel is hier ontspoord. Het rode blokje rechts in beeld bevindt zich op het aangrijpingspunt van de aanrijdkracht.



Figuur 2: Verloop van de zijdelingse krachten, door het spoor uitgeoefend op het voorlopende wielstel van de CAF-tram als functie van de tijd. Langs de horizontale as is de tijd uitgezet in seconden en langs de verticale as de zijdelingse kracht in kN. De zijdelingse kracht op het linker wiel is rood weergegeven en de zijdelingse op het rechter wiel groen. De aanrijding vindt plaats vanaf tijdstip $t = 6.17$ s. Op tijdstip $t = 6.36$ s is het wielstel uit het spoor.

De simulatie van de aanrijding is een aantal keren herhaald met gewijzigde omstandigheden: Het aangrijpingspunt en de grootte van de aanrijdkracht zijn gevarieerd en de simulatie is herhaald met voertuigmodellen van de Amsterdamse Combino en de Rotterdamse Citadis. Alle simulaties zijn uitgevoerd met de wiel- en railprofielen die worden toegepast op de Uithoflijn. Daarnaast is de simulatie met de Amsterdamse tram herhaald met de wiel- en railprofielen die in Amsterdam worden toegepast, maar dit maakte geen verschil voor het resultaat van de simulatie.

De uitgevoerde simulaties hebben de volgende resultaten opgeleverd.

Nr.	Tram	Afstand aanrijdkracht tot hart loopwerk [m]	Grootte aanrijdkracht [kN]	Resultaat
1	CAF-tram	4.420	70	Ontsporing
2	CAF-tram	2.000	70	Geen ontsparing
3	CAF-tram	0.000	70	Geen ontsparing
4	CAF-tram	4.420	35	Geen ontsparing
5	Amsterdamse tram	3.550	70	Ontsporing
6	Rotterdamse tram	4.775	70	Ontsporing

Tabel 2: Overzicht simulatieresultaten.

De simulaties nummers 2 en 3 hebben betrekking op situaties waarbij de CAF-tram niet op de kop, maar opzij wordt aangereden. Dit leidt niet tot een ontsparing.

In simulatie nummer 4 vindt de aanrijding plaats met een lichter voertuig (bijvoorbeeld een personenauto). De tram ontspoord dan niet.

Bij een herhaling van de eerste simulatie met een Amsterdamse en een Rotterdamse tram ontsporen deze ook.

4.9 Beantwoording van de onderzoeksvragen

Op grond van de resultaten van de analyse kunnen de onderzoeksvragen als volgt worden beantwoord.

1. Wat kan op basis van de videobeelden van de ontsparing, de sporen op de ontsparingslocatie, de sporen op de tram en aanvullende informatie van Provincie Utrecht worden gezegd over het begin van de ontsparing?

Antwoord: Uit de videobeelden volgt dat de tram eerst aan de rechter voorzijde van de kop contact heeft gemaakt met de zijkant van de bestelwagen. Dit heeft geleid tot ontsparing van het voorste loopwerk van de tram naar de binnenzijde van de boog.

2. Wat moet ongeveer het verloop van de aanrijdkracht zijn geweest tussen de tram en de bestelwagen?

Antwoord: De gemiddelde aanrijdkracht moet circa 70 kN zijn geweest over een tijdsduur van 119 tot 179 ms.

3. Kan met de antwoorden op bovenstaande vragen de ontsparing in een simulatie worden gereconstrueerd?

Antwoord: Ja, de ontsparing is succesvol gereconstrueerd.

4. Welke voertuigparameters van de ontspoorde tram hebben een rol gespeeld bij de ontsporing en hoe verhouden deze voertuigparameters zich tot die van andere lagevloertrams?

Antwoord: Uit de simulatieresultaten volgt dat de positie van het aangrijpingspunt van de aanrijdkracht bepalend is geweest voor het ontsporen. Tussen de voertuigparameters van de onderzochte lagevloertrams zijn geen significante verschillen gevonden die zouden kunnen leiden tot een groter risico op ontsporing voor de Utrechtse CAF-tram.

5 Conclusie

De simulatieresultaten bevestigen dat de ontsporing het gevolg is van een samenloop van omstandigheden. Het gewicht van de aangereden bestelwagen en het gegeven dat deze door de kop van de tram is aangereden hebben ertoe geleid dat de tram is ontspoord. Uit de simulatieresultaten volgt dat de tram niet zou zijn ontspoord bij een aanrijding met een lichter wegvoertuig of op een ander deel van de tram, dichterbij het loopwerk.

Uit de simulatieresultaten volgt verder dat andere tramtypen in dezelfde situatie ook zouden ontsporen. Volgens de simulatieresultaten is de CAF-tram niet gevoeliger voor ontsporingen dan de andere beschouwde lagevloertrams. Hoewel dit niet uit de simulatieresultaten is gebleken, wordt de ontsporingveiligheid van de CAF-tram gunstig beïnvloed door de hoogte van de wielflenzen, die bij de CAF-tram groter is dan bij de andere beschouwde lagevloertrams.