

DEKRA Rail

Ontsporingrisico en gevolgschade bij aanrijdingen

4 augustus 2021



Managementsamenvatting

Naar aanleiding van de recente aanrijdingen van de CAF-trams met ontsporing tot gevolg is voor de trams op een aantal overwegen een snelheidsbeperking ingesteld van 20 km/h. Provincie Utrecht wil graag inzichtelijk hebben in hoeverre deze snelheidsbeperking leidt tot een afname van de kans op ontsporing en beperking van de gevolgschade.

DEKRA Rail voert naar aanleiding daarvan onderzoek uit waarbij antwoord gegeven wordt op de volgende vragen:

1. Welk effect heeft een snelheidsverlaging tot 20 km/h op de kans op ontsporen bij aanrijdingen op overwegen?
2. Welk effect heeft een snelheidsverlaging tot 20 km/h op de te verwachten gevolgschade bij een aanrijding met ontsporing tot gevolg?

Voor de beantwoording van de onderzoeksvragen is gebruik gemaakt van een combinatie van voertuig-baansimulaties en handberekeningen. Beschouwd zijn de situaties van de aanrijdingen die hebben plaatsgevonden op de Laan van Maarschalkerweerd, de Koekoekslaan en de Roerdomplaan. Het beeldmateriaal en de beschikbare rapportages van deze aanrijdingen zijn als input voor het onderzoek gebruikt.

De voertuig-baansimulaties zijn uitgevoerd in het multi-bodysimulatiepakket VAMPIRE Pro met behulp van het bestaande voertuigmodel van de vijfdelige CAF-tram van 33 meter lang. De aanrijding op de Laan van Maarschalkerweerd heeft met dit type tram plaatsgevonden. De aanrijdingen op de Koekoekslaan en de Roerdomplaan hebben beide plaatsgevonden met een zevendelige CAF-tram van 41 meter lang. Omdat in de onderzochte situaties de eerste twee rijtuigbakken bepalend zijn voor het al dan niet ontsporen van de tram, en deze rijtuigbakken voor beide tramtypen hetzelfde zijn, is er in dit onderzoek voor gekozen alle simulaties met het voertuigmodel van de vijfdelige tram te simuleren.

De handberekeningen zijn uitgevoerd in Excel en dienen om bij benadering de aanrijdkracht en de kinetische energie van de voertuigen voor en na de botsing te bepalen.

Om een inschatting te maken van de gevolgschade bij snelheidsverlaging tot 20 km/h zijn deze drie aanrijdingen vergeleken met aanrijdingen van trams in andere steden, aan de hand van de openbare informatie die hierover beschikbaar is (o.a. van de Onderzoeksraad voor Veiligheid). Dit betreft een kwalitatieve inschatting.

Op grond van de onderzoeksresultaten kan het volgende geconcludeerd worden:

1. Welk effect heeft een snelheidsverlaging tot 20 km/h op de kans op ontsporen bij aanrijdingen op overwegen?

Antwoord: Uit de resultaten van de voertuig-baansimulaties volgt dat bij aanrijdingen onder verder gelijkblijvende omstandigheden verlaging van de snelheid naar 20 km/h niet leidt tot het voorkomen van ontsporingen.

Bij alle drie de onderzochte aanrijdingen was de zijdelingse impact van de auto tegen de tram bepalend voor het ontsporen. Deze impact was het gevolg van de snelheid en de massa van de auto en was onafhankelijk van de snelheid van de tram. Alleen op de Koekoekslaan was er daarnaast ook sprake van een impact in de rijrichting van de tram.

2. Welk effect heeft een snelheidsverlaging tot 20 km/h op de te verwachten gevolgschade bij een aanrijding met ontsporing tot gevolg?

Antwoord:

- Verlaging van de snelheid van de tram van 40 naar 20 km/h leidt tot een reductie van de kinetische energie van de tram met een factor 4.
- Wanneer geen obstakels worden geraakt, zal de afstand die de tram na de ontsporing aflegt totdat deze tot stilstand komt, de remweg, eveneens sterk afnemen, naar verwachting ongeveer met een factor 4.
- Wanneer wel obstakels worden geraakt, zal de impact hiervan sterk afnemen, met een factor 4 of meer. Mogelijk worden door de verkorting van de remweg minder of geen obstakels meer geraakt.
- Daarbij komt nog dat de lagere tramsnelheid leidt tot meer tijd voor de trambestuurder om te reageren en om een remming in te zetten.

Door dit alles is een aanzienlijke reductie van de gevolgschade bij ontsporingen te verwachten.

Inhoudsopgave

Managementsamenvatting	2
Inhoudsopgave	4
1 Inleiding	5
2 Vraagstelling	5
3 Methode	5
4 Resultaten	6
4.1 Kentallen aanrijdingen	6
4.2 Aanrijdkrachten, impuls en kinetische energie	6
4.3 Voertuig-baansimulaties bij actuele snelheid aanrijding en bij 20 km/h	7
4.4 Informatie tramontsporingen in andere steden	9
4.5 Vergelijking tramontsporingen Provincie Utrecht met elders	10
5 Conclusies	11
Bijlage 1 Referentiedocumenten	13
Bijlage 2 Ingevulde vragenlijst	14
Bijlage 3 Analyse videobeelden Koekoekslaan en Roerdomplaan	15
Bijlage 4 Berekeningen impuls, kinetische energie en aanrijdkracht	16
Bijlage 5 Overzicht kentallen aanrijdingen CAF-trams Provincie Utrecht	17
Bijlage 6 Informatie aanrijdingen andere steden	18

1 Inleiding

Naar aanleiding van de recente aanrijdingen van de CAF-trams met ontsporing tot gevolg is voor de trams op een aantal overwegen een snelheidsbeperking ingesteld van 20 km/h. Provincie Utrecht wil graag inzichtelijk hebben in hoeverre deze snelheidsbeperking leidt tot een afname van de kans op ontsporing en beperking van de gevolgschade.

In Hoofdstuk 2 van dit rapport is de vraagstelling van het onderzoek opgenomen. De werkwijze die gevolgd is om tot een oordeel te komen is beschreven in Hoofdstuk 3. De resultaten zijn in Hoofdstuk 4 beschreven en de conclusie van de beoordeling in Hoofdstuk 5.

2 Vraagstelling

Het onderzoek dient antwoord te geven op de volgende vragen.

1. Welk effect heeft een snelheidsverlaging tot 20 km/h op de kans op ontsporen bij aanrijdingen op overwegen?
2. Welk effect heeft een snelheidsverlaging tot 20 km/h op de te verwachten gevolgschade bij een aanrijding met ontsporing tot gevolg?

3 Methode

Voor de beantwoording van de onderzoeksvragen is gebruik gemaakt van een combinatie van voertuig-baansimulaties en handberekeningen. Beschouwd zijn de situaties van de aanrijdingen die hebben plaatsgevonden op de Laan van Maarschalkerweerd, de Koekoekslaan en de Roerdomplaan. Het beeldmateriaal en de beschikbare rapportages van deze aanrijdingen zijn als input voor het onderzoek gebruikt.

De voertuig-baansimulaties zijn uitgevoerd in het multi-bodysimulatiepakket VAMPIRE Pro met behulp van het bestaande voertuigmodel van de vijfdelige CAF-tram van 33 meter lang. De aanrijding op de Laan van Maarschalkerweerd heeft met dit type tram plaatsgevonden. De aanrijdingen op de Koekoekslaan en de Roerdomplaan hebben beide plaatsgevonden met een zevendelige CAF-tram van 41 meter lang. Omdat in de onderzochte situaties de eerste twee rijtuigbakken bepalend zijn voor het al of niet ontsporen van de tram, en deze rijtuigbakken voor beide tramtypen hetzelfde zijn, is er in dit onderzoek voor gekozen alle simulaties met het voertuigmodel van de vijfdelige tram te simuleren.

De handberekeningen zijn uitgevoerd in Excel en dienen om bij benadering de aanrijdkracht en de kinetische energie van de voertuigen voor en na de botsing te bepalen.

Om een inschatting te maken van de gevolgschade bij snelheidsverlaging tot 20 km/h zijn deze drie aanrijdingen vergeleken met aanrijdingen van trams in andere steden, aan de hand van de openbare informatie die hierover beschikbaar is (o.a. van de Onderzoeksraad voor Veiligheid). Dit betreft een kwalitatieve inschatting.

Het onderzoek is opgebouwd uit de volgende onderdelen:

1. Vaststelling van de kentallen van de aanrijdingen op de Koekoekslaan en de Roerdomplaan in overleg met Provincie Utrecht aan de hand van een vragenlijst en het beschikbare beeldmateriaal (voor de Laan van Maarschalkerweerd is dit al gebeurd): verloop van de aanrijding, snelheid van de tram, indicatieve snelheid van de auto, indicatieve massa van de auto, beladingsgraad van de tram.
2. Berekening van aanrijdkrachten en impuls en kinetische energie voor en na de botsing bij de actuele snelheid op basis van de vastgestelde kentallen.
3. Berekening van aanrijdkrachten en impuls en kinetische energie bij een snelheid van 20 km/h.
4. Uitvoering en analyse van voertuig-baansimulaties met de actuele snelheid van de trams en met een snelheid van 20 km/h voor het bepalen van de kans op ontsporen. (Wat er gebeurt na de ontsporing maakt geen deel uit van deze simulaties.)
5. Verzamelen van informatie over tramontsporingen in andere steden.
6. Vergelijking beschouwde aanrijdingen CAF-trams met tramontsporingen in andere steden, rekening houdend met voertuigsnelheid en voertuigmassa.

4 Resultaten

4.1 Kentallen aanrijdingen

Op basis van de rapportages van de aanrijdingen op de Koekoekslaan [1] en de Laan van Maarschalkerweerd [2], een door Provincie Utrecht ingevulde vragenlijst en het beeldmateriaal dat van de aanrijdingen beschikbaar is, zijn de kentallen vastgesteld van de aanrijdingen op de Laan van Maarschalkerweerd, de Koekoekslaan en de Roerdomplaan. Deze kentallen betreffen het verloop van de aanrijding, de snelheid van de tram, de indicatieve snelheid van de auto, de indicatieve massa van de auto en de beladingsgraad van de tram.

De ingevulde vragenlijst is opgenomen in Bijlage 2. De analyse van de videobeelden is vastgelegd in Bijlage 3. Uit deze analyse zijn bij benadering de tijdsduren van de aanrijdingen op de Koekoekslaan en de Roerdomplaan bepaald en de snelheden haaks op het spoor.

Zie Bijlage 5 voor een beschrijvend overzicht van de aanrijdingen.

4.2 Aanrijdkrachten, impuls en kinetische energie

Uit de kentallen van de drie onderzochte aanrijdingen zijn bij benadering de impuls, de kinetische energie en de aanrijdkracht berekend. Deze grootheden zijn bepaald voor de auto in de richting haaks op het spoor, voor de tram bij de snelheid tijdens de aanrijding en voor de tram bij een snelheid van 20 km/h. Deze berekeningen zijn uitgevoerd in Excel. Het betreffende Excelblad is weergegeven in Bijlage 4.

Op grond van de handberekeningen in Excel is het volgende vastgesteld.

1. Bij de aanrijdingen op de Koekoekslaan en de Roerdomplaan waren de auto's bijna twee keer lichter dan de bestelwagen op de Laan van Maarschalkerweerd, echter de snelheidscomponent haaks op de tram was op de Koekoekslaan en de Roerdomplaan ruim twee keer zo groot als op de Laan van Maarschalkerweerd. Als gevolg hiervan was

de kinetische energie van de auto ten opzichte van de tram op de Koekoekslaan en de Roerdomplaan ruim drie keer zo hoog als op de Laan van Maarschalkerweerd.

2. Doordat bij de aanrijding op de Roerdomplaan de auto is teruggeveerd, is hier een kortdurende zeer hoge aanrijdkracht gevonden.
3. Verlaging van de snelheid van de tram van 40 naar 20 km/h leidt tot een reductie van de kinetische energie van de tram met een factor 4. Bij de hier onderzochte aanrijdingen zou verlaging van de snelheid naar 20 km/h leiden tot een reductie van de kinetische energie van de tram met een factor 2 tot 3,6:
 - Op de Laan van Maarschalkerweerd bedroeg de snelheid van de tram 35 km/h en zou de kinetische energie bij een snelheid van 20 km/h een factor 3 lager zijn geweest.
 - Op de Koekoekslaan bedroeg de snelheid van de tram 29,5 km/h en zou de kinetische energie bij een snelheid van 20 km/h een factor 2 lager zijn geweest.
 - Op de Roerdomplaan bedroeg de snelheid van de tram 38 km/h en zou de kinetische energie bij een snelheid van 20 km/h een factor 3,6 lager zijn geweest.

Naar aanleiding van de gevonden kentallen en de resultaten van de handberekeningen zijn de volgende aanrijdkrachten ingevoerd in de voertuig-baansimulaties.

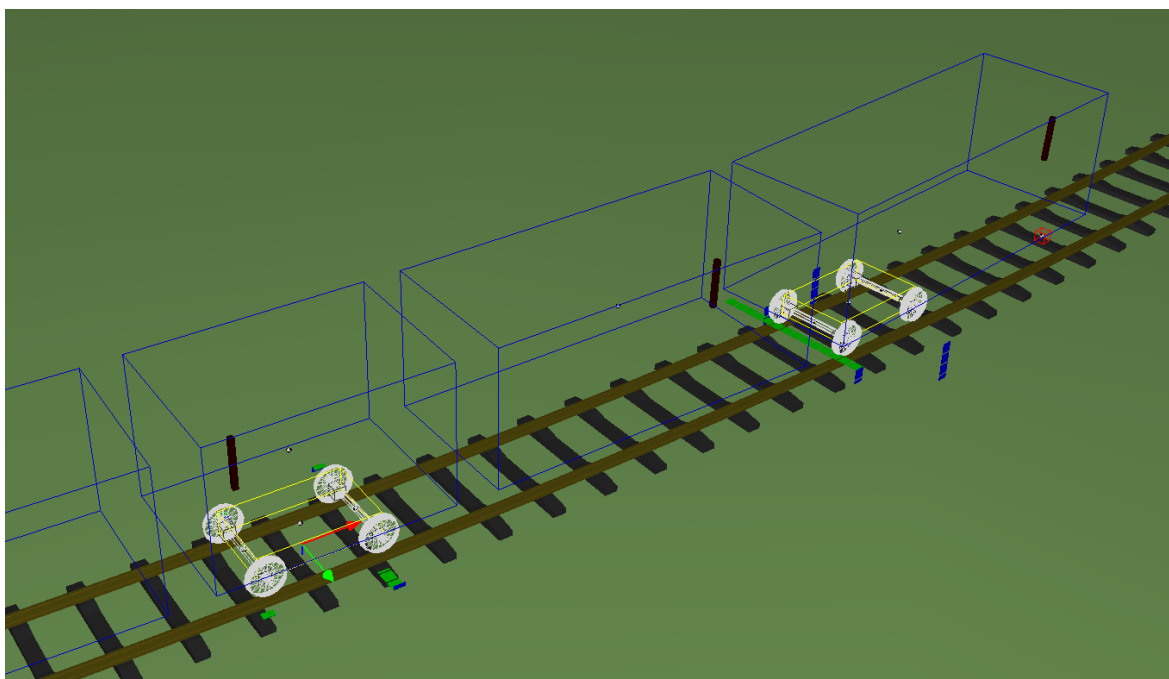
Locatie	Snelheid tram	Zijdelingse kracht	Kracht in langsricting	Tijdsduur kracht
Laan van Maarschalkerweerd	35 km/h	70 kN	-	143 ms
	20 km/h	70 kN	-	143 ms
Koekoekslaan	29,5 km/h	110 kN	280 kN	50 ms
	20 km/h	110 kN	140 kN	75 ms
Roerdomplaan	38 km/h	600 kN	-	40 ms
	20 km/h	600 kN	-	40 ms

Tabel 1: Aanrijdkrachten.

4.3 Voertuig-baansimulaties bij actuele snelheid aanrijding en bij 20 km/h

De aanrijdingen op de Laan van Maarschalkerweerd, de Koekoekslaan en de Roerdomplaan zijn gereconstrueerd in voertuig-baansimulaties met behulp van het softwarepakket VAMPIRE Pro, versie 6.60. De simulaties zijn uitgevoerd met de daadwerkelijke snelheid en met een snelheid van 20 km/h en met de berekende aanrijdkrachten conform Tabel 1.

Ter illustratie is in Figuur 1 een momentopname weergegeven van de simulatie van de aanrijding op de Laan van Maarschalkerweerd. Het vooroplopende wielstel is hier ontspoord. De positie waarop de tram door de auto is aangereiden is zichtbaar als een rood blokje rechts in beeld.



Figuur 1: Simulatie van de aanrijding met ontsporing tot gevolg op de Laan van Maarschalkerweerd.

De uitgevoerde simulaties hebben de volgende resultaten opgeleverd.

Locatie	Snelheid tram	Resultaat simulatie
Laan van Maarschalkerweerd	35 km/h 20 km/h	Tram ontspoor Tram ontspoor
Koekoekslaan	29,5 km/h 20 km/h	Tram ontspoor Tram ontspoor
Roerdomplaan	38 km/h 20 km/h	Tram ontspoor Tram ontspoor

Tabel 2: Resultaten van de voertuig-baansimulaties.

In alle voertuig-baansimulaties leidt de zijdelingse aanrijding aan de voorzijde van de tram tot een ontsporing. Het terugbrengen van de snelheid van de tram naar 20 km/h onder verder gelijkblijvende omstandigheden leidt niet tot het voorkomen van een ontsporing.

De resultaten van de voertuig-baansimulaties bevestigen het vermoeden dat voor het ontsporen niet de snelheid van de tram, maar de zijdelingse impact van de auto tegen de tram bepalend is. Deze impact is het gevolg van de snelheid en de massa van de auto en is onafhankelijk van de snelheid van de tram. Alleen op de Koekoekslaan is er daarnaast sprake van een impact in de rijrichting van de tram, die wel afhankelijk is van de snelheid van de tram. Bij een snelheid van 20 km/h is deze impact kleiner dan bij de daadwerkelijke snelheid van 29,5 km/h, maar dit voorkomt niet dat de tram ontspoor.

4.4 Informatie tramontsporingen in andere steden

Om een vergelijking te kunnen maken tussen de beschouwde aanrijdingen met de CAF-trams, en tramontsporingen in andere steden is online informatie verzameld. Het is daarbij veelal wel mogelijk om, op basis van de beeldinformatie, kentallen als voertuigmassa's in te schatten. De snelheden ten tijde van de aanrijding zijn echter doorgaans niet gegeven en alleen globaal in te schatten op basis van het schadebeeld in combinatie met de afgelegde weg na de aanrijding.

In onderstaande tabellen zijn de kentallen van de tramontsporingen in andere steden weergegeven. Zie Bijlage 6 voor een uitgebreider overzicht van de gevonden informatie.

Datum ongeval	Omschrijving	Kentallen		Opmerkingen
20 mei 2014	Rotterdam Centrum, Karel Doormanstraat	Massa's Snelheden Schade ⁽¹⁾	Tram: ca. 36,7 t Auto: 953-1050 kg Tram: Onbekend Auto: Onbekend 1	Op basis van de afgelegde weg en de schade zullen de snelheden van beide voertuigen relatief laag zijn geweest. De tram is wel deels ontspoord.
25 juni 2017	Antwerpen, kruispunt Sint-Bernardsesteenweg-Zaanstraat	Massa's Snelheden Schade ⁽¹⁾	Tram: ca. 41,3t Auto: 1295–1895kg Tram: 25-35km/h Auto: Onbekend 4	Op basis van de schade en afgelegde afstand is de inschatting dat de snelheid ergens tussen 25 en 35km/h gelegen hebben.
22 oktober 2018	Amsterdam, IJburglaan	Massa's Snelheden Schade ⁽¹⁾	Tram: ca.36t Auto: 1696-1823kg + ca. 290kg (aanhanger) Tram: ca.30km/h Auto: ca.35km/h 3	Het betrof hierbij een auto met aanhanger. De tram kwam tot stilstand tegen een bovenleidingportaal.
4 juli 2019	Amsterdam, Weesperplein	Massa's Snelheden Schade ⁽¹⁾	Tram: ca.36t Auto: ca. 1800kg Tram: Onbekend Auto: Onbekend 1	Gezien de schade en de afgelegde weg van de voertuigen na de aanrijding, was de snelheid relatief laag.
21 juli 2020	Rotterdam, Brielselaan	Massa's Snelheden Schade ⁽¹⁾	Tram: ca. 36,7t Auto: ca. 1800kg Tram: Onbekend Auto: Onbekend 1	Gezien de schade en de afgelegde weg van de voertuigen na de aanrijding, was de snelheid relatief laag.
12 november 2020	Rotterdam, Rhijnauwensingel	Massa's Snelheden	Tram: ca. 36,7t Auto: 1271-1541kg Tram: 25-35km/h Auto: Onbekend	Tram is na aanrijding tegen een boom gereden en vervolgens met de

Datum ongeval	Omschrijving	Kentallen		Opmerkingen
		Schade ⁽¹⁾	4	neus op de stoep tot stilstand gekomen. Gezien de schade en de afgelegde weg van de tram na de aanrijding, was de snelheid relatief hoog (schatting: 25-35km/h).
4 februari 2021	Zürich Altstetten	Massa's Snelheden Schade ⁽¹⁾	Tram: ca. 39,2t Auto: 1295–1895kg Tram: 25-35km/h Auto: Onbekend 4	Gezien de schade en de afgelegde weg van de tram na de aanrijding, was de snelheid relatief hoog (schatting: 25-35km/h).

⁽¹⁾ Inschatting schadebeeld: 1 = Lichte schade, 2 = middelgrote schade, 3 = grote schade, 4 = zeer grote schade

Tabel 3: Overzicht tramontsporingen in andere steden.

4.5 Vergelijking tramontsporingen Provincie Utrecht met elders

Een tram heeft, vergeleken met het overige wegverkeer, een lange remweg. In het rapport van de Raad voor Transportveiligheid [4] wordt t.a.v. de vermijdbaarheid van ongevallen voorgerekend dat bij een snelheid van 30 km/h de stopafstand van een tram net zo groot is als de stopafstand van een auto bij een snelheid van 50 km/h.

Wanneer de informatie uit §4.4 vergeleken wordt met de kentallen van de aanrijdingen in Utrecht, dan is vast te stellen dat er onmiskenbaar een relatie is tussen de snelheid van de voertuigen ten tijde van de aanrijding en de ontstane schade.

Aanrijdingen met lage snelheid resulteren in relatief weinig schade. Voorbeelden hiervan zijn de aanrijding in de Karel Doormanstraat in Rotterdam Centrum en de aanrijding op het Weesperplein te Amsterdam.

Bij hogere snelheden is de hoeveelheid kinetische energie vanzelfsprekend groter, wat resulteert in een grotere impact en een langere remweg van de tram. Voorbeelden hiervan zijn de aanrijding op de IJburglaan in Amsterdam en de aanrijding op Rhijnauwensingel in Rotterdam.

Ook blijkt dat aanrijdingen met materieel dat qua voertuigconcept vergelijkbaar is met de CAF-voertuigen, eenzelfde schadebeeld vertonen in het geval van een zijdelingse aanrijding met een auto. In alle gevonden gevallen is de tram met 1 of meer draaistellen ontspoord na een (zijdelingse) aanrijding met een auto. De aanrijdingen komen daarbij, vanuit het schadebeeld, het meest overeen met de aanrijdingen in Amsterdam IJburglaan (22 oktober 2018), Rotterdam Rhijnauwensingel (12 november 2020) en Zürich Altstetten (4 februari 2021).

5 Conclusies

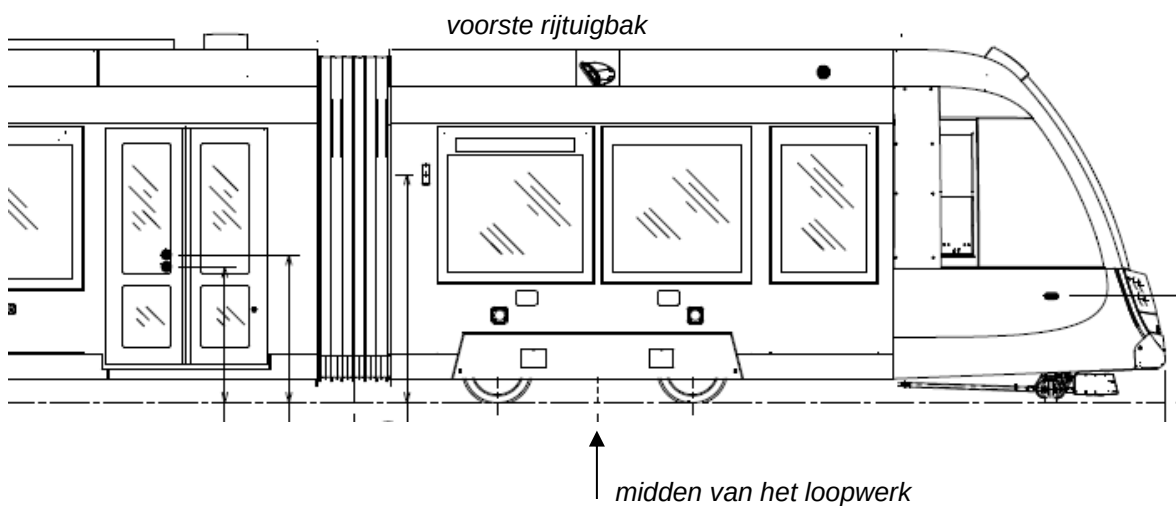
Op grond van de onderzoeksresultaten kunnen de onderzoeksvragen als volgt worden beantwoord.

1. Welk effect heeft een snelheidsverlaging tot 20 km/h op de kans op ontsporen bij aanrijdingen op overwegen?

Antwoord: Uit de resultaten van de voertuig-baansimulaties volgt dat bij aanrijdingen onder verder gelijkblijvende omstandigheden verlaging van de snelheid naar 20 km/h niet leidt tot het voorkomen van ontsporingen.

Bij alle drie de onderzochte aanrijdingen was de zijdelingse impact van de auto tegen de tram bepalend voor het ontsporen. Deze impact was het gevolg van de snelheid en de massa van de auto en was onafhankelijk van de snelheid van de tram. Alleen op de Koekoekslaan was er daarnaast ook sprake van een impact in de rijrichting van de tram.

Een belangrijke factor bij de drie beschouwde aanrijdingen met ontsporing tot gevolg is het gegeven dat het hier gaat om moderne lagevloertrams waarvan de voorste rijtuigbak op één loopwerk rust en relatief ver voor dit loopwerk uitsteekt, zie Figuur 2. In alle drie de beschouwde gevallen heeft de aanrijding aan de voorzijde van de tram plaatsgevonden. Dit zal bij de huidige lagevloertrams eerder tot een ontsporing leiden dan bij de oude SIG-trams, waarbij de voorste rijtuigbak op twee loopwerken rustte. Uit de vergelijking die is uitgevoerd in paragraaf 4.5 en uit voertuig-baansimulaties die in een eerder onderzoek zijn uitgevoerd [2] volgt dat de Utrechtse trams niet sneller ontsporen dan lagevloertrams in andere steden.



Figuur 2: Voorzijde tram. De voorzijde steekt 5,238 m uit voor het midden van het loopwerk (bron: CAF).

2. Welk effect heeft een snelheidsverlaging tot 20 km/h op de te verwachten gevolgschade bij een aanrijding met ontsporing tot gevolg?

Antwoord:

- Verlaging van de snelheid van de tram van 40 naar 20 km/h leidt tot een reductie van de kinetische energie van de tram met een factor 4.
- Wanneer geen obstakels worden geraakt, zal de afstand die de tram na de ontsporing aflegt totdat deze tot stilstand komt, de remweg, eveneens sterk afnemen, naar verwachting ongeveer met een factor 4.
- Wanneer wel obstakels worden geraakt, zal de impact hiervan sterk afnemen, met een factor 4 of meer. Mogelijk worden door de verkorting van de remweg minder of geen obstakels meer geraakt.
- Daarbij komt nog dat de lagere tramsnelheid leidt tot meer tijd voor de trambestuurder om te reageren en om een remming in te zetten.

Door dit alles is een aanzienlijke reductie van de gevolgschade bij ontsporingen te verwachten.

Op de laan van Maarschalkerweerd zou de kinetische energie bij een snelheid van 20 km/h een factor 3 lager zijn geweest, met als gevolg een kleinere impact bij de aanrijding van de bovenleidingmast en de stoeprand en daardoor naar verwachting minder schade aan de tram.

Op de Koekoekslaan zou de kinetische energie bij een snelheid van 20 km/h een factor 2 lager zijn geweest, met als gevolg een kleinere impact bij de aanrijding van de auto en de bovenleidingmast, mogelijk minder letsel van de autobestuurder en naar verwachting minder materiële schade aan de tram en de bovenleiding. Hierbij dient opgemerkt te worden dat de trambestuurder bij deze aanrijding geremd heeft, waardoor bij een snelheidslimiet van 20 km/h, de daadwerkelijke snelheid tijdens de aanrijding nog lager zou zijn geweest.

Op de Roerdomplaan zou de kinetische energie bij een snelheid van 20 km/h een factor 3,6 lager zijn geweest. In aanmerking genomen dat de tram hier onder andere tegen de bovenleidingmast en de rechter perronrand tot stilstand kwam en zonder deze obstakels een langere remweg zou hebben gehad, en in aanmerking genomen dat deze remweg bij een snelheid van 20 km/h een factor 3 tot 4 korter zou zijn geweest, zou bij een snelheid van 20 km/h de tram naar verwachting tot stilstand zijn gekomen voordat deze de bovenleidingmast en de perronrand aan de rechterzijde zou raken. Ook zou de tram minder ver zijn opgeklommen tegen de perronrand links. Bij een snelheid van 20 km/h zou er dus aanzienlijk minder materiële schade aan het voertuig, de perrons en de bovenleiding zijn geweest.

Bijlage 1 Referentiedocumenten

Nr.	Titel / beschrijving	Kenmerk	Versie	Datum
1	Onderzoeksrapport aanrijding Koekoekslaan	---	v1.0 def.	21-06-2021
2	Ontsporinganalyse Laan van Maarschalkerweerd	DR/21/210142/002	v1.0 def.	30-04-2021
3	Trambotsing Rijswijk, onderzoek naar de trambotsing te Rijswijk van 2 maart 2014	RV14-0133	v12	27-02-2015
4	DE 'VRIJE' TRAMBAAN, Veiligheidsstudie tramongevallen: botsveiligheid, infrastructuur en de bestuurlijke factoren	---	---	Sept. 2003
5	Rapport Veiligheidsrisico's van de Nederlandse stadstram	---	---	28-08-2000

Bijlage 2 Ingevulde vragenlijst

Aanrijding Koekoekslaan:

- Snelheid tram op moment van aanrijding volgens voertuigregistratie: ca. 29.5 km/h
- Snelheid auto (geschat uit videobeelden): ca. 35 km/h
- Merk/type auto: Renault Talisman (1491kg)
- Aantal reizigers in tram: 7
- Crashelementen waren niet ingedrukt
- Tweede/derde loopwerk nog in spoor: ja, beide nog in het spoor
- Afgelegde afstand na aanrijding (geschat o.b.v beelden en afstanden in Google maps): ca. 10m

Aanrijding Roerdomplaan:

- Snelheid tram op moment van aanrijding volgens voertuigregistratie: ca. 38 km/h
- Snelheid auto (geschat uit videobeelden): ca. 35 km/h
- Merk/type auto: Peugeot 308 (1279kg)
- Aantal reizigers in tram: ca. 10
- Tweede/derde loopwerk nog in spoor: 2^e loopwerk niet, 3^e loopwerk wel
- Afgelegde afstand na aanrijding (geschat o.b.v beelden en afstanden in Google maps): ca. 25m

Bijlage 3 Analyse videobeelden Koekoekslaan en Roerdomplaan

Video Roerdomplaan framerate 50 20 ms per beeld

frame no	tijd [ms]	
0	0	voorzijde auto achter paal
7	140	motorkap vervormt (circa 1,5 m voorbij de paal)
8	160	voorwaartse snelheid auto afgenomen, kop tram opzij verplaatst
9	180	auto klein stukje achteruit
18	360	rechter voorzijde auto achter paal, auto gedraaid
Voorwaartse snelheid auto voor aanrijding	10.7 m/s	38.6 km/h
Achterwaartse snelheid auto na aanrijding	7.5 m/s	27 km/h
Tijdsduur kracht tussen auto en tram: circa	40 ms	

Video Koekoekslaan framerate 20 50 ms per beeld

frame no	tijd [ms]	
0	0	voorzijde auto net voorbij paal
8	400	auto midden op overweg, tram verandert van richting (circa 4 m verder)
9	450	auto en tram hebben dezelfde snelheid
12	600	achterwiel auto op eerste spoorstaaf
17	850	achterwiel auto boven tweede spoorstaaf
Snelheid auto voor aanrijding	10 m/s	36 km/h
Snelheid haaks op spoor begin aanrijding	6 m/s	22 km/h
Tijdsduur kracht tussen auto en tram: circa	50 ms	

Bijlage 4 Berekeningen impuls, kinetische energie en aanrijdkracht

		Laan van Maarschalkerweerd	Koekoekslaan	Roerdomplaan
Auto:		Bestelwagen	Renault Talisman	Peugeot 308
Massa (inclusief inzittenden)	10^3 kg	2.5	1.591	1.379
<i>Voor aanrijding:</i>				
Snelheidscomponent haaks op tram	km/h	14.8	35	35
	m/s	4.1	9.7	9.7
Impuls haaks op de tram	10^3 kg m/s; kNs	10.3	15.5	13.4
Kinetische energie ten opzichte van de tram	10^3 kg m ² /s ² ; kNm	21.1	75.2	65.2
<i>Na aanrijding:</i>				
Snelheidscomponent haaks op tram	m/s	-	6	-8
Impuls	10^3 kg m/s; kNs	-	-	-11.032
Kinetische energie	10^3 kg m ² /s ² ; kNm	-	-	44.128
<i>Tijdens aanrijding:</i>				
Tijdsduur eerste contact met tram	ms	143	50	40
Gemiddelde botsvertraging auto	m/s ²	-	74.4	443.1
Gemiddelde kracht op de auto, haaks op het spoor	kN	70	118	611
Tram:		33 m	41 m	41 m
Aantal reizigers		5	7	10
Massa (inclusief inzittenden)	t	42.6	55.7	56.0
Snelheid op moment aanrijding	km/h	35	29.5	38
	m/s	9.7	8.2	10.6
		geen remming	snelremming vanaf ca 36 km/h	
Impuls	10^3 kg m/s; kNs	414.0	456.7	590.8
Kinetische energie	10^3 kg m ² /s ² ; kNm	2012.5	1871.0	3117.9
Afgelegde afstand na aanrijding	m	25	10	25
gemiddelde snelheidsafname per m	s ⁻¹	0.39	0.82	0.42
Aantal ontspoorde loopwerken		4	1	2
Tram, snelheid 20 km/h:				
Snelheid	m/s	5.6	5.6	5.6
Impuls	10^3 kg m/s; kNs	236.6	309.6	310.9
Kinetische energie	10^3 kg m ² /s ² ; kNm	657.1	860.0	863.7

Bijlage 5 Overzicht kentallen aanrijdingen CAF-trams Provincie Utrecht

Datum ongeval	Locatie ongeval	Betrokken voertuigen	Omschrijving	Snelheid aanrijding	Afgelegde afstand na aanrijding	Schadebeeld 1 = Licht 2 = Middel 3 = Groot 4 = Zeer groot	Afbeeldingen	
16 maart 2021 (11:00u)	Laan van Maarschalkerweerd	CAF-tram / Jumbo bestelbus	Auto komt van rechts en rijdt tegen tram. Tram ontspoord	Auto: ±32 km/h Tram: ±35 km/h	ca. 25m (schatting)	4		
17 april 2021 (ca. 8:14 uur)	Nieuwegein, Koekoekslaan	CAF-tram / personenauto	Tram ontspoord	Auto: ±35 km/h Tram: ±29,5 km/h	ca. 10m (schatting)	4		
26 mei 2021 (ca.9.30 uur)	Nieuwegein, nabij tramhalte Doorslag (Roerdomplaan)	CAF-tram / personenauto	Tram volledig uit de rails gelopen en op een perron terechtgekomen	Auto: ±35 km/h Tram: ±38 km/h	ca. 25m (schatting)	4		

Bijlage 6 Informatie aanrijdingen andere steden

Datum ongeval	Locatie ongeval	Betrokken voertuigen	Omschrijving	Snelheid aanrijding	Afgelegde afstand na aanrijding	Schadebeeld 1 = Lichte schade 2 = Middel schade 3 = Grote schade 4 = Zeer grote schade	Afbeeldingen	
20 mei 2014 (avond)	Rotterdam Centrum, Karel Doormanstraat	Citadis / personenauto	De tram komt tegen een auto aan waarbij zowel de auto als de tram behoorlijke schade opliepen. Tram ontspoord.	Onbekend	5-10m (schatting)	1		
25 juni 2017 (tijdstip onbekend)	Antwerpen, kruispunt Sint-Bernardsesteenweg-Zaanstraat, vlak bij het Kielpark.	Tram De Lijn / personenauto	De auto raakte bij het afslaan de tram en werd meegesleurd. Ook een verlichtingspaal knakte af en de tram schuurde meters langs de auto. Over zijn gehele lengte kwam de tram uit de rails.	Onbekend	20-30m (schatting)	4		
22 oktober 2018 (voor 10:00u)	Amsterdam, IJburglaan	Combino / auto met aanhanger	Auto rijdt door rood. Tram Lijn 26 ontspoord na botsing met auto op overweg en komt tot stilstand tegen portaal.	Auto: ±35 km/h Tram: ±30 km/h	5-6m (schatting)	3		
4 juli 2019 (voor 10:00u)	Amsterdam, Weesperplein	Combino / kleine bestelbus	Tram ontspoord na botsing met bestelbus op kruispunt.	Onbekend	5-6m (schatting)	1		

Datum ongeval	Locatie ongeval	Betrokken voertuigen	Omschrijving	Snelheid aanrijding	Afgelegde afstand na aanrijding	Schadebeeld 1 = Lichte schade 2 = Middel schade 3 = Grote schade 4 = Zeer grote schade	Afbeeldingen	
21 juli 2020 (tijdstip onbekend)	Rotterdam, Brielselaan	Citadis / taxi	Tram ontspoord na aanrijding met taxi.	Onbekend	2-3m (schatting)	1		
12 november 2020 (ca. 11:45u)	Rotterdam, Rhijnauwensingel	Citadis / personenauto	Tram ontspoord nadat de tram in botsing kwam met een automobilist die de overgang op reed. De tram is tegen een boom gereden en vervolgens met zijn neus op de stoep tot stilstand gekomen.	Onbekend	35-40m (schatting)	3	 	
4 februari 2021 (ochtend)	Zürich Altstetten	Tram / personenauto	Auto bij rechts afslaan in botsing gekomen met de tram van Lijn 4. Tram ontspoorde daarbij.	Onbekend	35-40m (schatting)	4	 