



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat



Ontwerp van een veilige en toekomstbestendige Harmsenknoop

Toepassing van microsimulaties bij het beoordelen van ruimtelijke ontwerpconcessies op verkeersveiligheid en doorstroming



Kimberley van Dongen - 5270995
15 augustus 2025
MSc thesis Civiele Techniek Transport & Planning

MSc Thesis Civiele Techniek Transport & Planning

Ontwerp van een veilige en toekomstbestendige Harmsenknoop

Toepassing van microsimulaties bij het beoordelen van ruimtelijke ontwerpconcessies op verkeersveiligheid en doorstroming

Auteur Kimberley van Dongen
Studentennummer 5270995
Datum 15 augustus 2025

Onderwijsinstelling Technische Universiteit Delft
Opleiding Civiele Techniek
Afdeling Transport & Planning
Adres Stevinweg 1, Delft
Begeleiders Dr.ir. A.J. (Arjan) van Binsbergen
Dr.ir. A.M. (Maria) Salomons

Opdrachtgever Rijkswaterstaat, West Nederland Zuid -Netwerk Ontwikkeling & Visie
Adres Laan op Zuid 45, Rotterdam
Contactpersonen Drs. I. (Igor) Heller
Drs.ing. M.E. (Marc) Roosenschoon

Figuur 1: Omslagfoto: Luchtfoto van het Hartelkanaal, de Harmsenbrug en de Harmsenknoop (Dijkstra-Vlaardingen, 2023)

Voorwoord

De voltooiing van mijn master thesis in de richting van Transport & Planning vormt het sluitstuk van mijn masteropleiding Civiele Techniek aan de TU Delft. Het onderzoek naar het ontwikkelen van een eerste ontwerpvoorstel voor een veilig en toekomstbestendig herontwerp van de Harmsenknoop, en het onderzoeken of microsimulaties in staat zijn om de effecten van ontwerpconcessies op het gebied van verkeersveiligheid en doorstroming realistisch en gedetailleerd in kaart te brengen, vond ik leerzaam en interessant. Het is erg uitdagend om je zelfbedachte ontwerp kritisch te evalueren met experts en microsimulaties, zodat je het beste uit jezelf en het mogelijke ontwerp haalt. Daarnaast bood dit onderwerp mij de gelegenheid om samen te werken met Rijkswaterstaat Regio West-Nederland-Zuid, waardoor ik alvast kennis kon maken met de werkgewoonten en processen binnen een organisatie.

Mijn thesisrapport is geschreven voor iedereen die geïnteresseerd is in het opstellen van een knooppuntontwerp en de toepassing van microsimulaties bij het beoordelen van ruimtelijke ontwerpconcessies op verkeersveiligheid en doorstroming. Door het wegontwerpproces te combineren met microsimulaties wordt onderzocht of deze bruikbaar zijn als alternatief of aanvulling op expertbeoordelingen bij het maken van keuzes binnen het wegontwerpproces.

Allereest wil ik graag mijn begeleiders dr.ir. A.J. (Arjan) van Binsbergen en dr.ir. A.M. (Maria) Salomons van de TU Delft bedanken voor de begeleiding en feedback gedurende het project. Drs. Ing. J.J. (Hans) de Boer verdient mijn waardering voor het in contact brengen van Rijkswaterstaat en mij, waardoor mijn samenwerking met Rijkswaterstaat is begonnen.

Vervolgens wil ik graag drs. I. (Igor) Heller en drs.ing. M.E. (Marc) Roosenschoon van Rijkswaterstaat bedanken voor de ondersteuning gedurende het project en voor hun begeleiding tijdens mijn tijd bij Rijkswaterstaat. Daarnaast wil ik de collega's van Rijkswaterstaat van de afdeling Netwerkontwikkeling en Visie bedanken voor hun ondersteuning en toelichtingen tijdens het project. Hierbij wil ik in het bijzonder René van Alphen, Giel de Bruijn en Geert Visser bedanken voor hun inhoudelijke begeleiding bij het wegontwerp, de microsimulatie en verkeersveiligheidsaspecten. Daarnaast ben ik dankbaar voor de ondersteuning van Danny Aarden, Maarten-Jan Eisma, Sarah de Jong, Joop Kokje, Ronald Ramsaran, Marc van Rongen en Judith van der Stel.

Tot slot wil ik deze mogelijkheid gebruiken om mijn familie en vrienden te bedanken, die mij zowel tijdens mijn master thesis als tijdens mijn studie hebben ondersteund, waardoor ik nu met trots kan zeggen dat ik mijn bachelor- en masteropleiding aan de TU Delft heb voltooid.

Rotterdam, augustus 2025

K.R. (Kimberley) van Dongen

Summary

The Dutch motorways are under pressure due to increasing traffic intensity, ageing infrastructure, and limited physical space (Rijkswaterstaat, 2025). These issues, particularly at interchanges, lead to challenges in creating safe and future-proof designs. In this study, the development of a redesign for the Harmsenknoop interchange was used to explore how design concessions influence traffic safety and flow. Concessions are defined as modifications to the ideal design that are necessary to make it spatially feasible, such as reducing the curve radius or lowering the design speed.

This research focuses on two main objectives:

1. To develop an initial design proposal for a safe and future-proof redesign of the Harmsenknoop.
2. To investigate whether microsimulations are capable to map the effects of design concessions on traffic safety and traffic flow in detail and realistically.

To achieve the first objective, the initial steps of Rijkswaterstaat's Road Design Framework (Kader Wegontwerpproces) were used as a basis, and from the elementary design cycle the steps problem analysis and the formulation of requirements and boundary conditions were added. In this way, Rijkswaterstaat's framework is combined with the design cycle from the academic sector. Based on a problem analysis and a design principles memorandum a Functional and Elementary Design was drawn up for the ideal design variant. The ideal variant depicts the optimal design based on traffic flow, safety related requirements and design guidelines. Subsequently, concessions were applied in the realistic design variant to account for spatial feasibility and the issues identified in the bottleneck analysis.

Normally, spatial limitations are considered after the ideal design has been developed. However, in this research, boundary conditions were defined in advance, to allow for the creation of designs that could be implemented within the available space realistically within the limited timeframe of this research.

To achieve the second objective, additional steps for the microsimulation research were added to the design process. The different design variants were analysed using the microsimulation software Paramics and the Surrogate Safety Assessment Model (SSAM). The results were evaluated with experts from Rijkswaterstaat to assess the value of microsimulation for evaluating traffic flow and safety within the road design process.

Problem analysis, bottlenecks and requirements

The problem analysis shows that the current design of the Harmsenknoop contains bottlenecks in both traffic flow and safety, mainly due to sharp curves in the connecting roads. The current situation of the Harmsenknoop is shown in Figure 2. The most significant bottlenecks are located on the connecting roads between the N57 and the Thomassentunnel and at the priority intersections from the A15 West to the N57, which lead to long waiting times and unsafe traffic situations.

In the design principles memorandum, future traffic intensities for 2040 were calculated using the Dutch Regional Model (NRM). Because the NRM has shortcomings in the distribution of traffic over the Calandbrug and the Thomassentunnel, the NRM results were supplemented by extrapolating the current distribution of traffic at the Harmsenknoop to 2040.

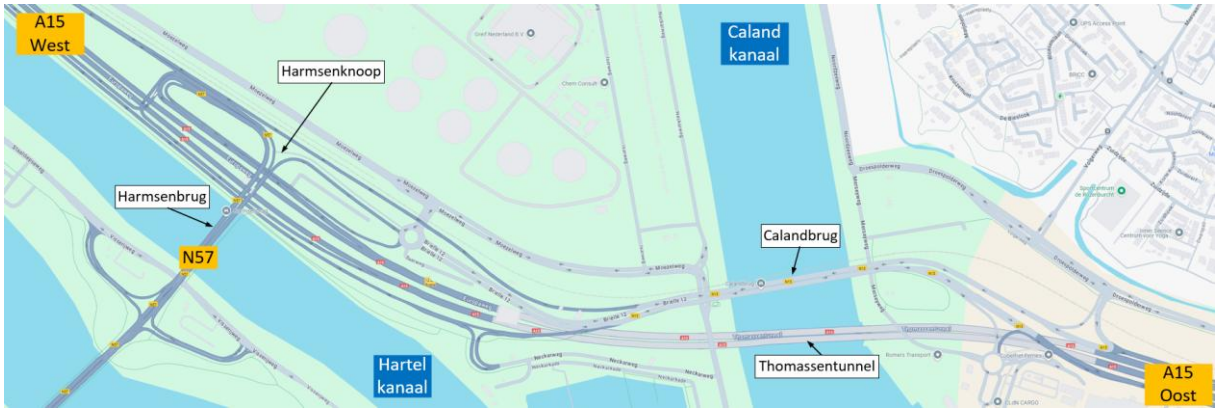


Figure 2: Current situation of the Harmsenknoop with labels of the traffic flows (Google Maps, z.d.)

The new design must accommodate ten traffic flows, including all connections between the A15 West, N57, Calandbrug and Thomassentunnel. Based on the lane scheme (rijstrokschema), indirect connecting roads with one lane are needed for eight of the ten connections. The connections between the N57 and Thomassentunnel require a (semi)direct connection with two lanes to meet the standard $\frac{Intensity}{Capacity} \leq 0,8$ (CIA - Rijkswaterstaat, 2024).

Ideal design

The choice for the suitable interchange configuration for the ideal design is based on the boundary conditions, whereby connections above the storage terminals of the Port of Rotterdam and above the Hartelkanaal are not possible. The main connections of the interchange are the A15 motorway and the connecting roads between the N57 and Thomassentunnel. For the latter connecting roads, a direct connection with a design speed of 70 km/h and a curve radius of 160 meters has been realized. The other connecting roads are arranged around these direct connecting roads. In this variant, the railway line must be lowered by 1.15 meters to enable the grade-separated intersection with the direct connecting road. The marker sketch of the ideal design is shown in Figure 3.

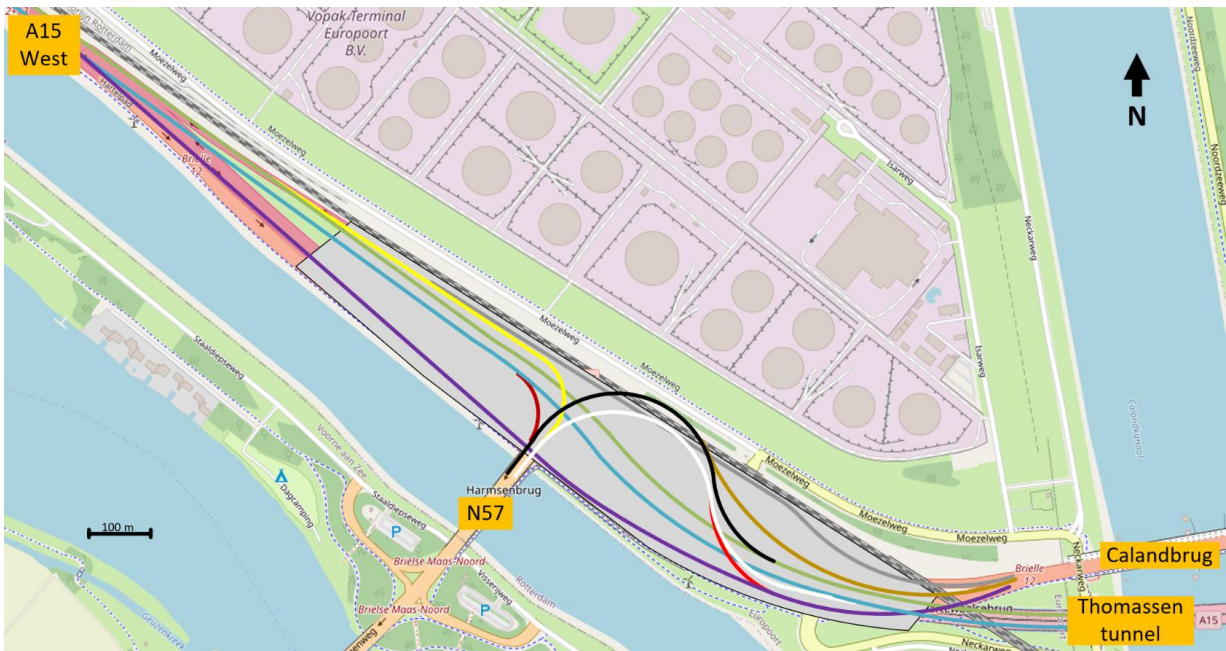


Figure 3: Marker sketch of the ideal design variant with different colours for the ten traffic flows

Realistic design

In the realistic variant, two design concessions have been applied to preserve the (vertical) position of the railway line and to avoid a grade-separated intersection of three connecting roads above each other. This resulted in the reduction of the curve radius of the connecting roads N57 ↔ Thomassentunnel, which also required lowering the design speed to 50 km/h in accordance with the Dutch Guidelines for Motorway Design (ROA). In addition, the connecting road N57 → A15 West was rerouted to prevent a grade-separated intersection of three connecting roads. The marker sketch of the realistic variant is shown in Figure 4.

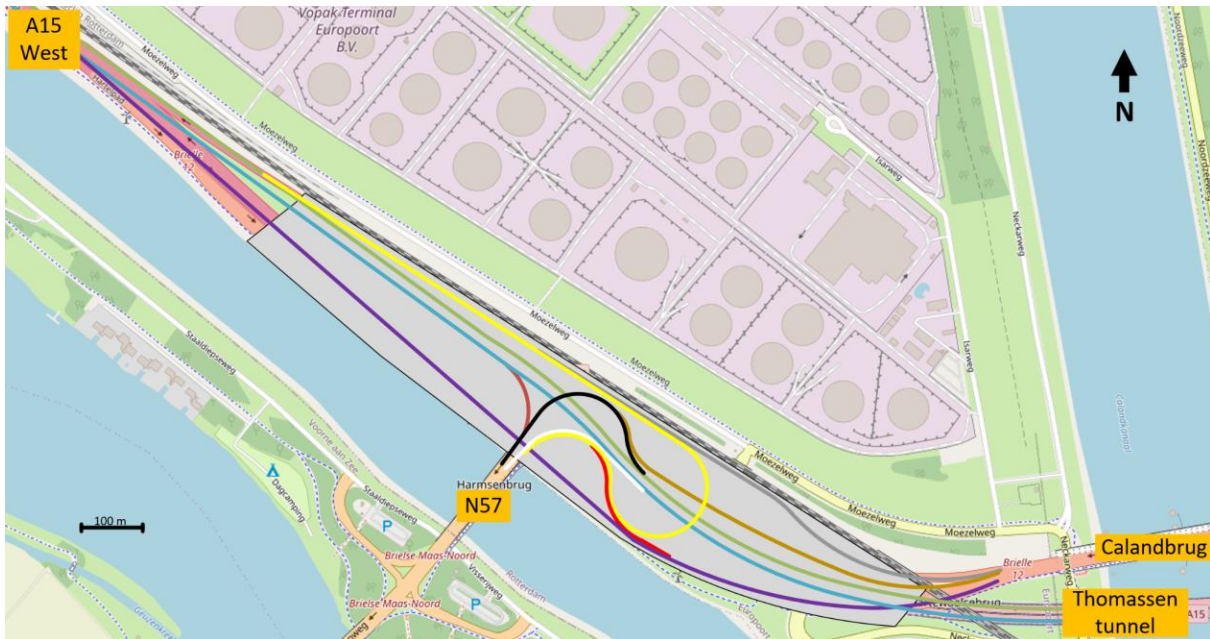


Figure 4: Marker sketch of the realistic design variant with different colours for the ten traffic flows

In both design variants, it was decided to remove the existing connection with the Moezelweg to create a more efficient and compact design. This intervention contributes to improved traffic flow, but also has consequences for the accessibility of the local road network. It is up to Rijkswaterstaat to weigh in a follow-up process whether removing this connection is desirable and acceptable within the broader policy objectives and interest assessment.

Microsimulations and results

The microsimulations with Paramics and SSAM (Surrogate Safety Assessment Model) provided valuable insights into the relative performance of the design variants. Paramics proved capable of identifying bottlenecks in traffic flow and enables the generation of quantitative values for travel times, travel time losses, and speeds. SSAM gave a first indication of traffic safety by determining the expected number of conflicts and then analysing these with safety parameters such as Time To Collision (TTC), Post-Encroachment Time (PET) and Speed Difference (DeltaS).

The ideal variant performs best in the microsimulations for both traffic safety and flow, but requires more space and a grade-separated intersection with the railway line. Although the realistic variant generally performs better than the current design in the microsimulations, it has a bottleneck during the evening rush hour. The connecting road Thomassentunnel → N57 has insufficient capacity due to the tighter curve radius and lower design speed, causing a traffic jam that extends back into the Thomassentunnel.

Discussion, conclusion and recommendations

The applied method resulted in a structured design process in which bottlenecks in the Harmsenknoop could be identified at an early stage and feasible design variants could be efficiently developed. By combining the Road Design Framework with the elementary design cycle from the academic sector, multiple design options could be quickly assessed against the boundary conditions and requirements. Microsimulations made it possible to provide insight into the performance of the variants in terms of traffic flow and safety, but at the same time, clear limitations of both microsimulation models were identified. Both Paramics and SSAM do not take into account aspects such as visibility and driver workload. SSAM also generates many more conflicts than expected based on accident data and does not account for height differences and traffic safety aspects of the environment. Further development and validation of SSAM are needed before it can be applied within the road design process.

Despite these limitations, the microsimulations have provided valuable insights for the road design process, particularly for the assessment of traffic flow and, to a lesser extent, for traffic safety. Bottlenecks in the design variants become visible at an early stage through microsimulations, and the variants can be quantitatively compared. However, the microsimulation software Paramics and SSAM have clear limitations, meaning that the results must always be interpreted critically and supplemented with expert knowledge and further research where necessary.

Based on the findings of this study, the following recommendations are made for further research. Extending the microsimulations with visibility distances, height differences and mental workload could lead to more realistic traffic safety analyses. In addition, calibrating SSAM based on accident data deserves attention, so that the relationship between conflicts and actual accidents can be better substantiated. Furthermore, it is useful to apply multiple future scenarios for traffic growth and socioeconomic developments and to investigate the effects of phased implementation of the design. Finally, the chosen method offers opportunities to develop new solutions for other complex junctions as well.

Samenvatting

De Nederlandse snelwegen staan onder druk door toenemende verkeersintensiteit, verouderde infrastructuur en beperkte fysieke ruimte (Rijkswaterstaat, 2025). Vooral bij knooppunten leidt dit tot uitdagingen in het realiseren van veilige en toekomstbestendige ontwerpen. In dit onderzoek is, aan de hand van het ontwikkelen van een herontwerp voor de Harmsenknoop, verkend hoe ontwerpconcessies invloed hebben op verkeersveiligheid en doorstroming. Concessies worden hierbij gedefinieerd als aanpassingen aan het ideale ontwerp die nodig zijn om het ruimtelijk inpasbaar te maken, zoals het verkleinen van de boogstraal of het verlagen van de ontwerpsnelheid.

In dit rapport staan twee doelstellingen centraal:

1. Het ontwikkelen van een eerste ontwerpvoorstel voor een veilig en toekomstbestendig herontwerp van de Harmsenknoop.
2. Het onderzoeken of microsimitaties in staat zijn om de effecten van ontwerpconcessies op het gebied van verkeersveiligheid en doorstroming realistisch en gedetailleerd in kaart te brengen.

Voor het behalen van de eerste doelstelling zijn de eerste stappen van het Kader Wegontwerpproces van Rijkswaterstaat als basis gehanteerd en zijn uit de elementaire ontwerpcyclus de stappen probleemanalyse en het opstellen van eisen en randvoorwaarden toegevoegd. Op deze manier is het kader van Rijkswaterstaat gecombineerd met de ontwerpcyclus uit de academische sector. Op basis van een probleemanalyse en uitgangspuntennotitie is een Functioneel en Elementair Ontwerp opgesteld voor de ideale ontwerpvariant. De ideale variant is het optimale ontwerp dat is gebaseerd op verkeersstromen, verkeersveiligheid gerelateerde eisen en de ontwerprichtlijnen. Vervolgens zijn in de realistische variant concessies doorgevoerd om rekening te houden met de inpasbaarheid en knelpuntenanalyse.

Normaliter worden ruimtelijke beperkingen pas na het ideale ontwerp meegenomen. In dit onderzoek zijn echter vooraf randvoorwaarden opgesteld, zodat binnen de beperkte tijd ontwerpen konden worden ontwikkeld die binnen de beschikbare ruimte gerealiseerd kunnen worden.

Om het tweede doel te bereiken, zijn aanvullende stappen voor het microsimitatie onderzoek toegevoegd aan het ontwerpproces. De verschillende ontwerpvarianten zijn geanalyseerd met behulp van microsimitatie software Paramics en het Surrogate Safety Assessment Model (SSAM). De resultaten zijn geëvalueerd met experts van Rijkswaterstaat om de waarde van microsimitatie te toetsen voor het beoordelen van doorstroming en verkeersveiligheid binnen het wegontwerpproces.

Probleemanalyse, knelpunten en eisen

Uit de probleemanalyse blijkt dat het huidige ontwerp van de Harmsenknoop knelpunten kent in doorstroming en verkeersveiligheid, met name vanwege scherpe bochten in de aansluitingen. De huidige situatie van de Harmsenknoop is weergegeven in Figuur 5. De grootste knelpunten bevinden zich op de verbindingswegen tussen de N57 en de Thomassentunnel, en bij de voorrangskruisingen van de A15 West naar de N57, die zorgen voor lange wachttijden en verkeersonveilige situaties.

In de uitgangspuntennotitie zijn toekomstige verkeersintensiteiten voor 2040 berekend met het Nederlands Regionaal Model (NRM). Omdat het NRM tekortkomingen kent in de verdeling van verkeer over de Calandbrug en de Thomassentunnel, zijn de resultaten van het NRM aangevuld door de huidige verdeling van het verkeer op de Harmsenknoop door te trekken naar 2040.

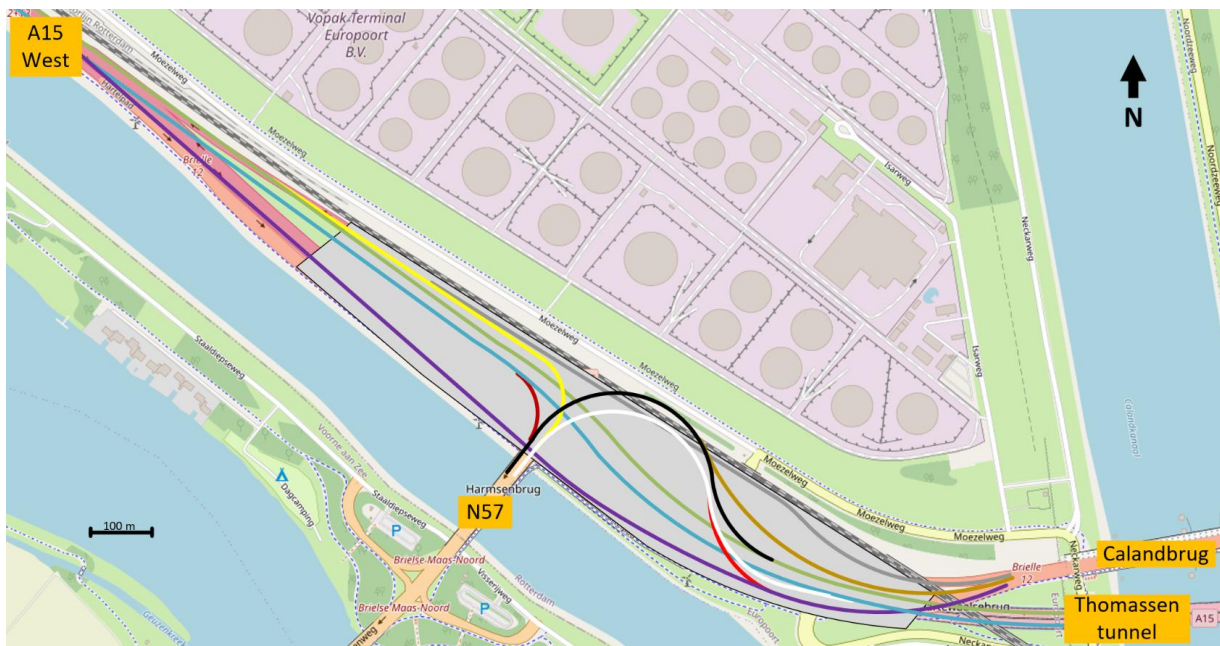


Figuur 5: Huidige situatie Harmsenknoep met de labels van de verkeersstromen (Google Maps, z.d.)

Het nieuwe ontwerp moet tien verkeersstromen accommoderen, waaronder alle relaties tussen de A15 West, N57, Calandbrug en Thomassentunnel. Op basis van het rijstrokschema zijn indirecte verbindingswegen met één rijstrook nodig voor acht van de tien verbindingen. De verbindingen tussen de N57 en Thomassentunnel vereisen een (semi)directe verbinding met twee rijstroken om aan de norm $\frac{\text{Intensiteit}}{\text{Capaciteit}} \leq 0,8$ te voldoen (CIA - Rijkswaterstaat, 2024).

Ideaal ontwerp

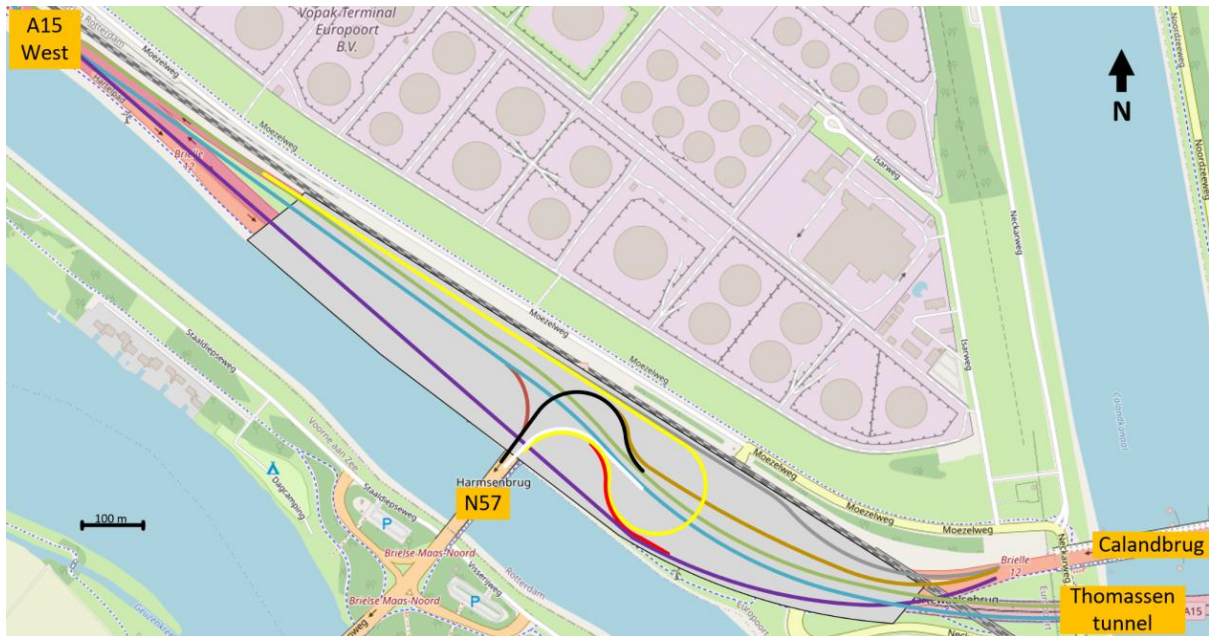
De keuze voor de geschikte knooppuntconfiguratie voor het ideale ontwerp is gebaseerd op de randvoorwaarden, waarbij verbindingen boven de opslagterminals van de Rotterdamse Haven en boven het Hartelkanaal niet mogelijk zijn. De belangrijkste verbindingen van het knooppunt zijn de A15 en de verbindingswegen tussen de N57 en Thomassentunnel. Voor deze laatste verbindingswegen is een directe verbinding met een ontwerpsnelheid van 70 km/h en een boogstraal van 160 meter gerealiseerd. De overige verbindingswegen zijn rond deze directe verbindingswegen aangelegd. In deze variant moet de Havenspoorlijn 1,15 meter worden verlaagd om de ongelijkvloerse kruising met de directe verbindingsweg mogelijk te maken. De viltstiftenschets van het ideale ontwerp is weergegeven in Figuur 6.



Figuur 6: Viltstiftenschets ideale ontwerpvariant met verschillende kleuren voor de tien verkeersstromen

Realistisch ontwerp

In de realistische variant zijn twee ontwerpconcessies doorgevoerd, zodat de (verticale) ligging van de Havenspoorlijn wordt behouden en zodat een ongelijkvloerse kruising met drie verbindingswegen boven elkaar wordt voorkomen. Dit heeft geleid tot het verkleinen van de boogstraal van de verbindingswegen N57 ↔ Thomassentunnel, waardoor ook de ontwerpsnelheid naar 50 km/h moest worden verlaagd conform de Richtlijnen Ontwerp Autosnelwegen (ROA). Daarnaast is de verbindingsweg N57 → A15 West verlegd om een ongelijkvloerse kruising van drie verbindingswegen te voorkomen. De viltstiftenschets van de realistische variant is weergegeven in Figuur 7.



Figuur 7: Viltstiftenschets realistische ontwerpvariant met verschillende kleuren voor de tien verkeersstromen

In beide ontwerpvarianten is gekozen om de bestaande aansluiting met de Moezelweg te verwijderen om tot een efficiënter en compacter ontwerp te komen. Deze ingreep draagt bij aan een verbeterde doorstroming, maar heeft ook consequenties voor de bereikbaarheid van het onderliggend wegennet. Het is aan Rijkswaterstaat om in een vervolgtraject af te wegen of het verwijderen van deze aansluiting wenselijk en acceptabel is binnen de bredere beleidsdoelstellingen en belangenafwegingen.

Microsimulaties en resultaten

De microsimulaties met Paramics en SSAM (Surrogate Safety Assessment Model) hebben waardevolle inzichten opgeleverd in de relatieve prestaties van de ontwerpvarianten. Paramics bleek goed in staat om knelpunten in de doorstroming te identificeren en maakt het mogelijk om kwantitatieve waarden voor reistijden, reistijdverliesuren en snelheden te genereren. SSAM gaf een eerste indicatie van de verkeersveiligheid door het verwachte aantal conflicten te bepalen en deze vervolgens te analyseren met veiligheidsparameters, zoals Time To Collision (TTC), Post-Encroachment Time (PET) en Snelheidsverschil (DeltaS).

De ideale variant presteert in de microsimulaties het best op zowel verkeersveiligheid als doorstroming, maar vraagt meer ruimte en vereist een ongelijkvloerse kruising met de Havenspoorlijn. Hoewel de realistische variant in de microsimulaties over het algemeen beter presteert dan het huidige ontwerp, kent deze variant een knelpunt in de avondspits. De verbindingsweg Thomassentunnel → N57 heeft met de krappere boogstraal en lagere ontwerpsnelheid onvoldoende capaciteit, waardoor file ontstaat die terugloopt tot in de Thomassentunnel.

Discussie, conclusie en aanbevelingen

De gevolgde methode heeft geleid tot een gestructureerd ontwerpproces, waarbij knelpunten in de Harmsenknoop vroegtijdig konden worden geïdentificeerd en haalbare ontwerpvarianten efficiënt konden worden ontwikkeld. Door het combineren van het Kader Wegontwerpproces met de elementaire ontwerpcyclus uit de academische sector konden meerdere ontwerpopties snel worden getoetst aan de randvoorwaarden en eisen. Microsimulaties maakten het mogelijk de prestaties van de varianten op doorstroming en verkeersveiligheid inzichtelijk te maken, maar tegelijkertijd zijn duidelijke beperkingen van beide microsimulatie modellen vastgesteld. Zo houden zowel Paramics als SSAM geen rekening met aspecten als zicht en de werklast van de bestuurder. SSAM genereert daarnaast veel meer conflicten dan op basis van ongevalsdata verwacht mag worden en houdt geen rekening met hoogteverschillen en verkeersveiligheidsaspecten uit de omgeving. Verdere ontwikkeling en toetsing van SSAM zijn nodig voordat het toegepast kan worden binnen het wegontwerpproces.

Ondanks deze beperkingen hebben de microsimulaties waardevolle inzichten opgeleverd voor het wegontwerpproces, met name voor de beoordeling van de doorstroming en in beperktere mate voor de verkeersveiligheid. Knelpunten in de ontwerpvarianten worden met microsimulaties vroegtijdig zichtbaar en de varianten kunnen kwantitatief worden vergeleken. De microsimulatie software Paramics en SSAM kennen echter duidelijke beperkingen, waardoor de resultaten altijd kritisch moeten worden geïnterpreteerd en waar nodig moeten worden aangevuld met expertkennis en vervolgonderzoek.

Op basis van de bevindingen in dit onderzoek worden de volgende aanbevelingen gedaan voor vervolgonderzoek. Het uitbreiden van de microsimulaties met zichtafstanden, hoogteverschillen en mentale werklast kan leiden tot realistischere verkeersveiligheidsanalyses. Daarnaast verdient het kalibreren van SSAM op basis van ongevalsdata aandacht, zodat de relatie tussen conflicten en daadwerkelijke ongevallen beter kan worden onderbouwd. Verder is het zinvol om meerdere toekomstscenario's te hanteren voor verkeersgroei en sociaaleconomische ontwikkelingen, en de effecten van gefaseerde aanleg van het ontwerp te onderzoeken. Tot slot biedt de gekozen methode mogelijkheden om ook bij andere complexe knooppunten tot nieuwe oplossingsrichtingen te komen.

Inhoudsopgave

Summary	iii
Samenvatting.....	vii
Inhoudsopgave	xi
1. Inleiding	1
1.1 Doelstelling.....	2
1.2 Scope	3
1.3 Maatschappelijke en wetenschappelijke relevantie	5
1.4 Leesgids van het rapport	6
2. Methode	7
2.1 Ontwerpproces.....	8
2.2 Probleemanalyse	10
2.3 Uitgangspuntennotitie	10
2.4 Randvoorwaarden en programma van eisen	10
2.5 Functioneel Ontwerp.....	11
2.6 Elementair Ontwerp.....	11
2.7 Knelpuntenanalyse.....	12
2.8 Opstellen realistische ontwerpvariant met ontwerpconcessies.....	12
2.9 Analyse van ontwerpvarianten en concessies met microsimitaties	12
2.10 Uitkomsten van microsimitatie evalueren	14
3. Probleemanalyse	16
3.1 Huidige situatie Harmsenknoop.....	16
3.2 Problemen met huidige Harmsenknoop	17
3.3 Toekomstige situatie en toekomstige problemen Harmsenknoop.....	21
4. Uitgangspuntennotitie	23
4.1 Toekomstige verkeersintensiteiten op de Harmsenknoop	23
4.2 Uitgangspunten voor toekomstige situatie.....	29
5. Randvoorwaarden en programma van eisen	33
5.1 Randvoorwaarden	33
5.2 Programma van eisen.....	34
Opstellen van het ontwerp:	
6. Functioneel Ontwerp.....	36
6.1 Rijstrokerschema	36
6.2 Keuze voor de geschikte knooppuntvorm.....	38
6.3 Viltstiftenschets.....	41
6.4 Type discontinuïteiten.....	42

6.5	Overzicht ontwerpkeuzes Functioneel Ontwerp.....	43
7.	Elementair Ontwerp.....	45
7.1	Horizontaal alignement.....	45
7.2	Verticaal alignement.....	46
7.3	Lengte in- en uitvoegstroken en controle van turbulentieafstanden.....	48
7.4	Dwarsprofiel.....	50
7.5	Maatregelen voor het realiseren van het ideale ontwerp.....	51
7.6	Overzicht ontwerpkeuzes Elementair Ontwerp.....	52
8.	Knelpuntenanalyse.....	53
8.1	Knelpunten van het ideale ontwerp.....	53
8.2	Oplosrichtingen van de knelpunten.....	54
9.	Realistische variant.....	56
9.1	Horizontaal alignement.....	56
9.2	Verticaal alignement.....	58
9.3	Lengtes in- en uitvoegstroken en controle van turbulentieafstanden.....	58
9.4	Dwarsprofiel.....	59
9.5	Overzicht ontwerpkeuze realistische ontwerpvariant.....	60
Microsimulatie analyse:		
10.	Opzetten microsimulatie.....	62
10.1	Keuze microsimulatie software.....	62
10.2	Benodigde input en gewenste output.....	63
10.3	Huidige ontwerp in Paramics en SSAM.....	63
10.4	Bepaling van het aantal simulatie-runs.....	64
10.5	Kalibratie van het microsimulatie model.....	65
11.	Ontwerpvarianten analyseren met microsimulaties.....	69
11.1	Huidige ontwerp met toekomstige intensiteiten.....	69
11.2	Ideale ontwerp.....	70
11.3	Realistische ontwerp.....	72
11.4	Analyse en vergelijking microsimulatie resultaten.....	73
Evaluatie, discussie en conclusie:		
12.	Evaluatie van ontwerp en microsimulatie resultaten.....	80
12.1	Evaluatie doorstromingsaspecten.....	80
12.2	Evaluatie verkeersveiligheidsaspecten.....	81
12.3	Evaluatie van de ontwerpvarianten.....	84
12.4	Evaluatie van de inzet van microsimulatie voor doorstroming en veiligheid.....	85
13.	Discussie.....	87

13.1 Reflectie op de ontwerpkeuzes	87
13.2 Kwaliteit en bruikbaarheid van microsimulaties	87
13.3 Methodologische beperkingen van het onderzoek	88
13.4 Validiteit, generaliseerbaarheid en implicaties voor praktijk en beleid	89
13.5 Aanbevelingen en aandachtspunten voor vervolgonderzoek	89
14. Conclusie	92
Referenties	94
Bijlagen:	
Bijlage 1 : Elementaire ontwerpcyclus en figuren uit het Kader Wegontwerpproces	99
Bijlage 2 : Verschillende routes over de Harmsenknoop	103
Bijlage 3 : Intensiteit-capaciteit verhouding 2018	108
Bijlage 4 : Weergave van locatie en labels van wegvakken op de Harmsenknoop	109
Bijlage 5 : Verkeersintensiteiten voor 2023 uit het INWEVA en voor 2040 uit het NRM	111
Verkeersintensiteiten 2023	111
Verkeersintensiteiten 2040	113
Maatgevende verkeersbelasting in 2023 (INWEVA) en 2040 (NRM)	116
Bijlage 6 : Berekening van de verdeling van het verkeer op de Harmsenknoop in 2023	118
Bijlage 7 : Berekening maatgevende verkeersbelasting in 2040 op basis van de verdeling van het verkeer in 2023	121
Bijlage 8 : Technische tekeningen	124
Bijlage 9 : Berekening van benodigde aantal rijstroken	127
Bijlage 10 : Informatie voor de keuze tot de geschikte knooppuntvorm	130
Bijlage 11 : Ligging van discontinuïteiten ideale ontwerp	135
Bijlage 12 : Omreisroutes naar de Moezelweg	137
Bijlage 13 : Overzicht van tabellen uit de ROA	141
Bijlage 14 : Uitwerking van het horizontaal alignement van het ideaal ontwerp	144
Bijlage 15 : Uitwerking van het verticaal alignement van het ideaal ontwerp	147
Bijlage 16 : Berekening van de lengtes van de in- en uitvoegstroken van het ideale ontwerp	152
Bijlage 17 : Turbulentielengtes in ideaal ontwerp	154
Bijlage 18 : Uitwerking dwarsprofiel van ideale ontwerp	155
Bijlage 19 : Uitwerking van het realistische ontwerp	158
Horizontaal alignement	158
Verticaal alignement	161
Lengtes in- en uitvoegstroken	163
Turbulentieafstanden in realistisch ontwerp	164
Dwarsprofiel	164

Bijlage 20 : Informatie over het opzetten van de microsimulatie in Paramics en SSAM	166
Huidige ontwerp in Paramics en SSAM	167
Bepaling van de standaarddeviaties van de testruns.....	169
Bijlage 21 : Python code voor trj-bestanden van SSAM.....	170
Bijlage 22 : Overzicht locaties en typering van conflicten uit SSAM voor huidige ontwerp met huidige intensiteit	172
Bijlage 23 : Huidige ontwerp in microsimulatie model	173
Bijlage 24 : Aangepaste viltstiftenschets ideale ontwerp	176
Bijlage 25 : Ideale ontwerp in microsimulatie model.....	177
Bijlage 26 : Realistische ontwerp in microsimulatie model	180
Bijlage 27 : Vergelijking microsimulatie resultaten	183
Bijlage 28 : Dichtheidsgrafieken van de TTC-waardes.....	192
Bijlage 29 : Vergelijking ontwerpvarianten	193

1. Inleiding

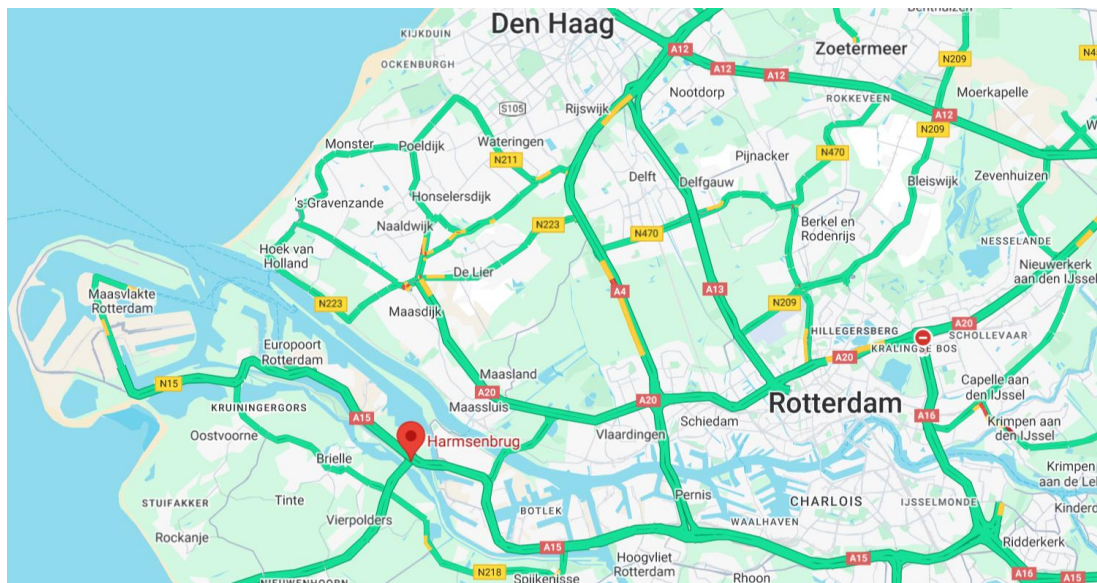
De Nederlandse snelwegen vormen een cruciale schakel in het transport van personen en goederen. Een veilige en efficiënte doorstroming op deze wegen is van groot belang voor de economische vitaliteit en bereikbaarheid van het land. Knooppunten spelen hierin een sleutelrol, omdat zij de verbindingen vormen tussen hoofdwegen en andere wegen. Door de toenemende verkeersdrukte, de groei van zwaarder verkeer en de veroudering van veel bestaande infrastructuur, komt de functionaliteit van deze knooppunten vaker onder druk te staan (Rijkswaterstaat, 2025).

Tegelijkertijd wordt het ingewikkelder om binnen de bestaande ruimtelijke beperkingen tot toekomstbestendige knooppuntontwerpen te komen die voldoen aan de Richtlijnen Ontwerp Autosnelwegen (ROA). Om een knooppunt realiseerbaar te maken binnen de beschikbare ruimte, moeten bijna altijd concessies worden gedaan aan het ideale ontwerp. Concessies zijn aanpassingen aan het ideale ontwerp om het ruimtelijk inpasbaar te maken. Dit betekent een tegemoetkoming met bijvoorbeeld het ruimtegebruik, zodat het ontwerp past binnen de fysieke context. Dergelijke concessies kunnen echter een negatieve invloed hebben op de verkeersveiligheid en doorstroming. De gevolgen van ontwerpconcessies worden momenteel in kaart gebracht met behulp van het Verkeersveiligheidskader van Rijkswaterstaat. Daarbij bepaalt een expert de verkeersveiligheidsrisico's van het ontwerp op kwalitatieve wijze, op basis van expertise en ervaring (Rijkswaterstaat - Kader verkeersveiligheid, 2020).

In dit rapport wordt onderzocht of de gevolgen van ontwerpconcessies op het gebied van verkeersveiligheid en doorstroming kwantitatief en realistisch in kaart kunnen worden gebracht met behulp van microsimitaties. Een microsimitatie is een verkeersmodel dat het gedrag van individuele weggebruikers en hun interactie met elkaar simuleert (Mint, z.d.). Indien de uitkomsten van de microsimitaties voldoende gedetailleerd en betrouwbaar zijn, kunnen ontwerpkeuzes in een vroeger stadium worden onderbouwd zonder te hoeven wachten op de beschikbaarheid van een expert of de resultaten van meer complexe modelberekeningen. Dit kan het wegontwerpproces versnellen.

Binnen het Nederlandse snelwegennet is de Harmsenknoop een goed voorbeeld van een knooppunt waar ruimtelijke beperkingen hebben geleid tot concessies aan het ideale ontwerp. Dit heeft geresulteerd in een compact knooppunt met scherpe bochten en steile hellingen, waardoor het huidige ontwerp sterk afwijkt van standaardontwerpen. Dit maakt het in combinatie met de verwachte verkeerstoename noodzakelijk om te onderzoeken hoe de Harmsenknoop heringericht kan worden om de verkeersveiligheid, doorstroming en toekomstbestendigheid te verbeteren.

Het verkeersknooppunt de Harmsenknoop verbindt in Zuid-Holland de N57 met de A15 nabij Rozenburg. In de directe omgeving van de Harmsenknoop komen veel wegen samen: verkeer van de N57 via de Harmsenbrug, verkeer van de Maasvlakte en Europoort via de westelijke kant van de A15, verkeer van de A15 uit de Thomassentunnel en verkeer vanaf de Calandbrug. De Calandbrug is onderdeel van de route voor vrachtverkeer dat gevaarlijke stoffen vervoert (Risicokaart, 2024). De ligging van de Harmsenknoop ten opzichte van het wegennet in de regio van Rotterdam en Den Haag is weergegeven in Figuur 8. Een overzicht van de locatie van de Harmsenbrug, Harmsenknoop, N57, A15, Calandbrug en Thomassentunnel is weergegeven in Figuur 9.



Figuur 8: Ligging van de Harmsenknoop in het wegennet van regio Rotterdam en Den Haag (Google Maps, z.d.)



Figuur 9: Overzicht Harmsenbrug, Harmsenknoop, N57, A15, Calandbrug en Thomassentunnel (Google Maps, z.d.)

1.1 Doelstelling

In dit rapport staan twee doelstellingen centraal:

1. Het ontwikkelen van een eerste ontwerpvoorstel voor een veilig en toekomstbestendig herontwerp van de Harmsenknoop.
2. Het onderzoeken of microsimitaties in staat zijn om de effecten van ontwerpconcessies op het gebied van verkeersveiligheid en doorstroming realistisch en gedetailleerd in kaart te brengen.

Om het eerste doel te bereiken, wordt gewerkt volgens de eerste stappen van het Kader Wegontwerpproces van Rijkswaterstaat (Rijkswaterstaat, 2019). Na een probleemanalyse en het opstellen van een uitgangspuntennotitie volgt een inventarisatie van de harde randvoorwaarden uit de omgeving en de eisen waaraan het nieuwe ontwerp moet voldoen. Binnen de beschikbare ruimte wordt vervolgens een ideale variant ontwikkeld die zoveel mogelijk aansluit bij de Richtlijnen Ontwerp Autosnelwegen. Deze ideale variant wordt onderworpen aan een knelpuntenanalyse, waarin aanvullende beperkingen en omgevingsfactoren worden meegenomen. Op basis daarvan wordt een realistischere variant opgesteld waarin gerichte ontwerpconcessies zijn doorgevoerd om aanvullende knelpunten te vermijden.

Voor het tweede doel wordt onderzocht of microsimitaties kunnen worden ingezet als onderbouwingsinstrument binnen het wegontwerpproces.

Daarbij worden de volgende drie ontwerpvarianten voor de Harmsenknoop geëvalueerd op verkeersveiligheid en doorstroming:

- Het huidige ontwerp (zonder aanpassingen);
- Het ideale ontwerp dat past binnen de harde randvoorwaarden;
- Het realistische ontwerp, waarin concessies voor aanvullende knelpunten zijn doorgevoerd.

De resultaten van deze microsimitaties worden gebruikt om de effecten op het gebied van verkeersveiligheid en doorstroming van de ontwerpconcessies van de verschillende ontwerpvarianten inzichtelijk te maken. Daarnaast worden de resultaten besproken met een verkeersveiligheidsexpert en een verkeersadviseur van Rijkswaterstaat om de betrouwbaarheid en toepasbaarheid van de microsimitaties te beoordelen. Op basis hiervan kan worden geconcludeerd of microsimitaties bruikbaar zijn als alternatief of aanvulling op expertbeoordelingen bij het maken van keuzes binnen het wegontwerpproces.

1.2 Scope

Het ontwikkelen van een eerste ontwerpvoorstel voor de herinrichting van de Harmsenknoop, in combinatie met het onderzoeken of microsimitaties in staat zijn om effecten van ontwerpconcessies in kaart te brengen, vormt een omvangrijk project. In dit onderzoek wordt het ontwerp opgesteld aan de hand van het Kader Wegontwerpproces van Rijkswaterstaat. Hierbij wordt uitsluitend de verkenningsfase doorlopen, waarin een Functioneel en Elementair ontwerp wordt opgesteld. Het volledige proces, inclusief deze verkennende fase, is weergegeven in Bijlage 1.

Er zijn drie redenen voor deze afbakening van het ontwerpproces. Ten eerste heeft Rijkswaterstaat nog geen definitieve keuze voor een vernieuwingsvariant van de Harmsenbrug en Harmsenknoop gemaakt. Ten tweede zijn de effectenstudies naar de omgeving van de Harmsenknoop nog niet afgerond en ten derde is de beschikbare tijd voor dit onderzoek beperkt tot een half jaar.

Voor het analyseren van de effecten van ontwerpconcessies wordt een microscopisch verkeersmodel opgesteld. Dit model genereert individuele voertuigtrajecten over het knooppunt en verzamelt gegevens met betrekking tot doorstroming en verkeersveiligheid. De microsimitatie richt zich uitsluitend op het wegennet dat direct deel uitmaakt van de Harmsenknoop, namelijk de aansluiting van de N57 via de Harmsenbrug, de A15 en de route over de Calandbrug. Het geografische gebied dat binnen de scope van zowel het ontwerp als het microsimitatie onderzoek valt, wordt weergegeven in Figuur 10 en is gemarkeerd met een rood kader. Binnen dit gebied wordt rekening gehouden met de ruimtelijke context, maar wordt de ondergrond buiten beschouwing gelaten.

Bepaalde aspecten vallen buiten de scope van dit onderzoek, aangezien de focus exclusief ligt op het geometrisch wegontwerp van de verbinding tussen de N57, de A15 en de Calandbrug. Bij het opstellen van het herontwerp van de Harmsenknoop worden enkel de ontwerpaspecten meegenomen die noodzakelijk zijn voor het uitvoeren van microsimitaties. Hierbij ligt de nadruk op aspecten die van directe invloed zijn op verkeersafwikkeling en rijgedrag. Onderdelen die vooral relevant zijn in latere fasen of gericht zijn op constructief, landschappelijk en beleidsmatig niveau worden buiten beschouwing gelaten. Dit maakt het mogelijk dat zowel de ontwikkeling van een eerste ontwerpvoorstel, als het onderzoek naar microsimitatie binnen de beschikbare tijd kan worden afgerond.



Figuur 10: Het gebied binnen de scope wordt gemarkeerd met een rood kader (Google Maps, z.d.)

De volgende aspecten worden niet meegenomen:

- De aansluiting van de N57 met de Visserijweg en overige aansluitingen aan de zuidwestzijde;
- De aansluiting van de Neckerweg met de route over de Calandbrug;
- De constructie van de Harmsenbrug en bijbehorende sterkteberekeningen;
- De gevolgen van zeespiegelstijging of getijdewerking op de waterstand in het Hartelkanaal;
- De aansluitingen van infrastructuur voor fietsers en voetgangers;
- De gevolgen voor de doorstroming en filevorming door een opening van de Calandbrug.

Binnen het Functioneel Ontwerp worden vrijwel alle onderdelen meegenomen, met uitzondering van de rittenanalyse en de ligging van verzorgingsplaatsen. De reden hiervoor is dat voor het herontwerp van de Harmsenknoop de toekomstige verkeersintensiteiten over het knooppunt van belang zijn, maar dat de herkomst en bestemming van het verkeer daarbij niet essentieel zijn. Verder bevinden zich in de omgeving van de Harmsenknoop geen verzorgingsplaatsen die invloed hebben op het ontwerp.

Het Elementair Ontwerp focust zich op het horizontale en verticale alignment van de wegen binnen het knooppunt, inclusief een globale inschatting van het dwarsprofiel. Gedetailleerde elementen zoals lengtemarkering, vluchtruimte, bergingszones en onderhoudspaden vallen buiten de scope, omdat deze nauwelijks invloed hebben op de doorstroming en verkeersveiligheid. Ook worden spitsstroken en doelgroepenstroken uitgesloten van het onderzoek. Spitsstroken zijn namelijk enkel effectief wanneer ze ook over de Harmsenbrug worden doorgetrokken, maar volgens de vernieuwingsopgave van de brug is dat niet aan de orde (Rijkswaterstaat, 2024). Daarnaast zouden doelgroepenstroken leiden tot capaciteitsverlies en worden pechhavens enkel in overweging genomen indien een deel van het ontwerp geen vluchtstrook bevat. Tot slot heeft de keuze tussen een grondtalud of een constructie op palen voor het ondersteunen van de verbindingswegen geen invloed op de uitkomsten van de microsimitaties, waardoor ook het onderzoek naar het type en de sterkte van deze constructies of taluds buiten de scope vallen.

1.3 Maatschappelijke en wetenschappelijke relevantie

Het herontwerpen van de Harmsenknoop heeft aanzienlijke maatschappelijke relevantie op het gebied van verkeersveiligheid, mobiliteit, milieu en sociale impact. Verkeersveiligheid speelt hierin een cruciale rol, aangezien het huidige ontwerp scherpe bochten bevat die de kans op ongevallen vergroten.

Door deze scherpe bochten te verminderen en het knooppunt efficiënter in te richten, kan de doorstroming verbeteren en neemt het risico op verkeersongevallen af. Dit draagt direct bij aan een veiliger wegennet voor zowel personen- als vrachtverkeer.

Daarnaast zorgt een betere doorstroming voor minder stilstaand verkeer, wat naast het verhogen van de verkeersveiligheid door het risico op kop-staartbotsingen en filevorming te verminderen, ook bijdraagt aan een schoner milieu door lagere emissies van schadelijke stoffen. Verder verbetert de herinrichting van de Harmsenknoop de bereikbaarheid van woon- en werkgebieden langs de N57 en A15, wat een positieve impact heeft op de sociaaleconomische ontwikkelingen in de regio.

Een sleutelaspect van dit onderzoek is de bijdrage aan wetenschappelijke kennis over het wegontwerpproces door meerdere innovatieve methoden te analyseren. Ten eerste wordt onderzocht in hoeverre microsimulaties inzicht kunnen bieden in verkeersveiligheids- en doorstromingsaspecten van ontwerpconcessies. Microsimulaties worden momenteel voornamelijk ingezet voor het beoordelen van doorstroming, terwijl verkeersveiligheidsanalyses hiermee zelden worden uitgevoerd (van Rongen & de Jong, 2025). Volgens verkeersadviseurs van Rijkswaterstaat en Sweco worden deze modellen niet standaard toegepast voor veiligheidsdoeleinden.

Daarnaast wordt geanalyseerd of de uitkomsten van microsimulaties kunnen dienen als basis voor ontwerpkeuzes. Dit zou het mogelijk maken om ontwerpalternatieven te beoordelen zonder dat daarvoor steeds specialistische verkeersveiligheidsexpertise nodig is.

Tot slot introduceert dit onderzoek een alternatieve ontwerpbenadering voor Rijkswaterstaat, waarbij niet wordt voortgebouwd op de bestaande situatie, maar een nieuw ontwerp vanaf de basis wordt ontwikkeld. Dit is voor de Harmsenknoop relevant, omdat eerdere studies van Rijkswaterstaat nog niet tot haalbare en effectieve verbeteringen hebben geleid (Heller, 2025). Daarnaast laat dit onderzoek zien hoe microsimulaties ingezet kunnen worden om ontwerpvarianten op doorstroming en verkeersveiligheid kwantitatief met elkaar te vergelijken. Door deze kwantitatieve analyse te combineren met kwalitatieve expertbeoordelingen, ontstaat een objectievere basis voor het beoordelen en prioriteren van projecten. Dit stelt Rijkswaterstaat in staat om gerichtere keuzes te maken en middelen effectiever toe te wijzen aan de meest urgente ontwerpaspecten.

Samenvattend is het herontwerpen van de Harmsenknoop niet alleen van technisch en infrastructureel belang, maar heeft het ook een significant maatschappelijk belang, met een verbetering van de verkeersveiligheid, milieukwaliteit en economische efficiëntie. Tegelijkertijd levert dit onderzoek een wetenschappelijke bijdrage door het innovatieve gebruik van microsimulaties voor verkeersveiligheidsanalyse en ontwerpafwegingen, waarmee nieuwe inzichten voor het onderbouwen van ontwerpkeuzes binnen het wegontwerpproces worden verkregen. Dit kan het werk binnen organisaties, zoals Rijkswaterstaat, vereenvoudigen, waardoor de productie omhooggaat.

1.4 Leesgids van het rapport

Na dit inleidende hoofdstuk (1) bevat dit rapport elf hoofdstukken en de discussie en conclusie. Tot slot bevat dit rapport een literatuurlijst en de bijlagen.

Hoofdstuk 2 beschrijft de methode en gaat in op de verschillende fasen van het ontwerpproces.

Hoofdstuk 3 geeft een overzicht van de probleemanalyse weer, waarbij zowel naar de huidige situatie en problemen als naar de verwachte toekomstige problemen wordt gekeken.

Hoofdstuk 4 definieert de uitgangspuntennotie met de verwachte toekomstige verkeersintensiteiten en de uitgangspunten voor de toekomstige situatie rond de Harmsenknoop.

Hoofdstuk 5 presenteert de harde en bespreekbare randvoorwaarden en het programma van eisen.

Hoofdstuk 6 beschrijft het Functioneel Ontwerp van de ideale ontwerpvariant, waarbij het benodigde aantal rijstroken en de keuze tot de geschikte knooppuntvorm worden gedefinieerd.

Hoofdstuk 7 werkt het Functioneel Ontwerp uit tot een Elementair ontwerp van de ideale ontwerpvariant en gaat daarbij in op het horizontaal en verticaal alignement.

Hoofdstuk 8 geeft een overzicht van de knelpuntenanalyse waarin het ideale ontwerpvariant wordt geconfronteerd met de bespreekbare randvoorwaarden en aanvullende omgevingsfactoren.

Hoofdstuk 9 presenteert de realistische ontwerpvariant waarin op basis van de knelpuntenanalyse concessies aan het ideale ontwerp worden doorgevoerd.

Hoofdstuk 10 zet het microsimulatiemodel op en kalibreert het model op basis van gegevens van de huidige situatie.

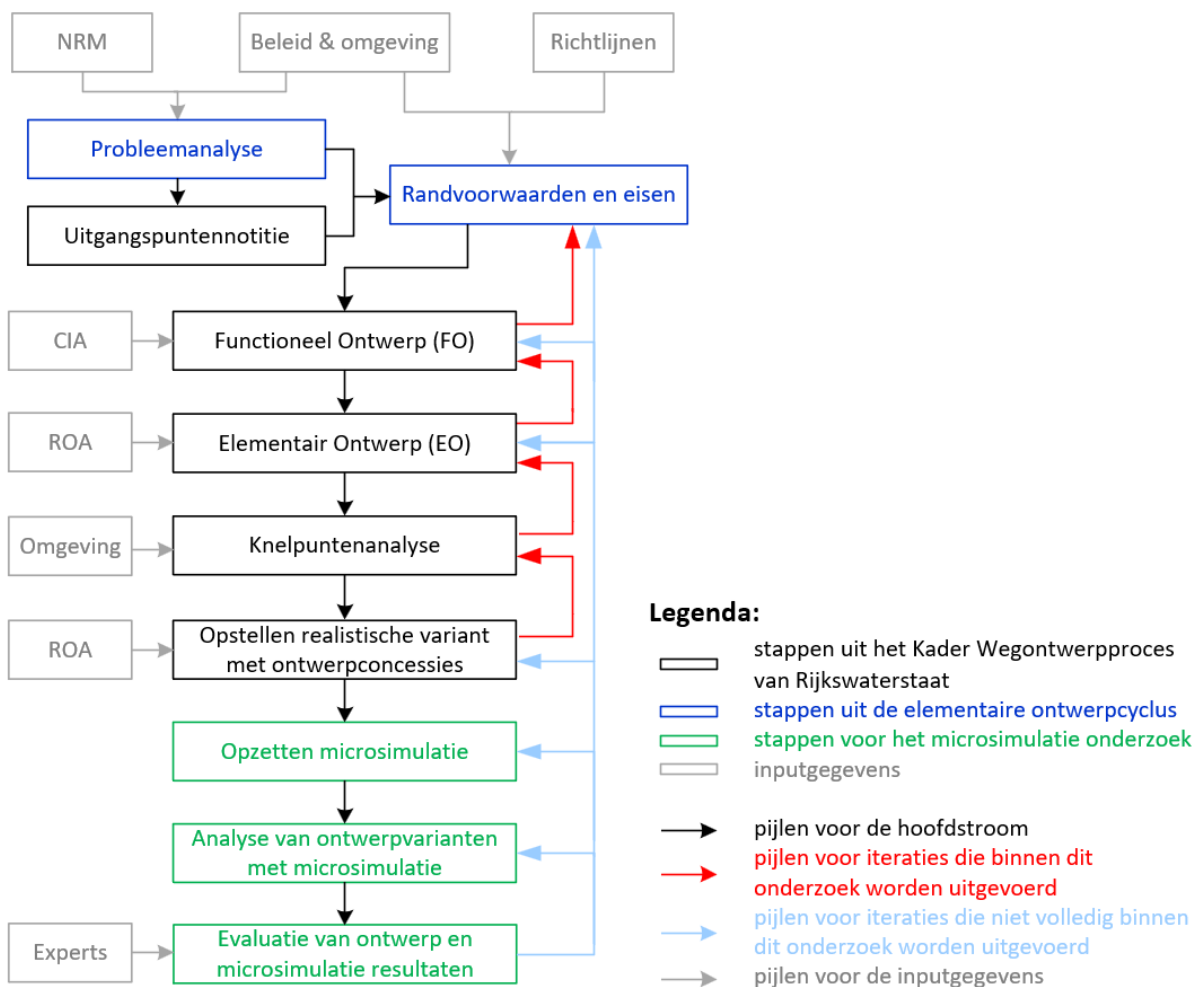
Hoofdstuk 11 analyseert de drie ontwerpvarianten (huidige ontwerp, ideale ontwerp, realistische ontwerp) met de microsimulatie en verzamelt resultaten met betrekking tot doorstromings- en verkeersveiligheidsaspecten.

Hoofdstuk 12 evalueert het ontwerp en de uitkomsten van de microsimulatie met experts op het gebied van wegontwerp, verkeersdoorstroming en verkeersveiligheid.

2. Methode

In dit hoofdstuk wordt de methode van dit onderzoek beschreven. Voor de doelstelling over het ontwikkelen van een eerste ontwerpvoorstel voor de Harmsenknoop, wordt het Kader Wegontwerpproces van Rijkswaterstaat als basis gehanteerd. Hieraan worden twee stappen toegevoegd uit de elementaire ontwerpcyclus, namelijk de probleemanalyse en het opstellen van randvoorwaarden en eisen. Op deze manier wordt het kader van Rijkswaterstaat gecombineerd met de ontwerpcyclus uit de academische sector. Om ook de tweede doelstelling over het onderzoeken of microsimulaties in staat zijn om effecten van ontwerpconcessies in kaart te brengen, te voltooien, worden extra stappen voor de microsimulatie aan de methode toegevoegd.

Het originele stappenplan van het Kader Wegontwerpproces voor aanlegprojecten en de elementaire ontwerpcyclus zijn weergegeven in Bijlage 1. Voor dit onderzoek zijn de eerste stappen uit het Kader Wegontwerpproces gecombineerd met de elementaire ontwerpcyclus en aangevuld met de uitbreiding voor het onderzoek naar de microsimulatie. Figuur 11 toont een weergave van de stappen die binnen dit onderzoek worden behandeld.



Figuur 11: Weergave van de ontwerpmethode, waarin de stappen van het Kader Wegontwerpproces zijn gecombineerd met de elementaire ontwerpcyclus en zijn aangevuld met de uitbreiding voor het onderzoek met microsimulatie

2.1 Ontwerpproces

Het ontwerpproces start met het opstellen van een probleemanalyse en een uitgangspuntennotitie, gebaseerd op het beleid, de omgeving en de prognoses van toekomstige verkeersintensiteiten uit het Nederlands Regionaal Model (NRM). Op basis van de gesignaleerde huidige en toekomstige problemen, de uitgangspunten voor de toekomstige situatie en de richtlijnen voor wegontwerp, wordt een overzicht opgesteld van de harde randvoorwaarden uit de omgeving en de eisen waaraan het toekomstige ontwerp van de Harmsenknoop moet voldoen.

Normaliter wordt in het Kader Wegontwerpproces van Rijkswaterstaat na de uitgangspuntennotitie gestart met het ontwikkelen van een ideaal ontwerp, zonder ruimtelijke randvoorwaarden vooraf. In dit onderzoek is gekozen om voor het Functioneel en Elementair Ontwerp randvoorwaarden op te stellen, die direct rekening houden met bestaande infrastructurele constructies, zoals de Thomassentunnel en Harmsenbrug. Dit betekent dat het ideale ontwerp al ontwerpconcessies bevat, maar dit maakt het mogelijk om binnen de beperkte tijd die voor dit onderzoek beschikbaar is, voldoende aandacht te geven aan de varianten die naar verwachting binnen de beschikbare ruimte gerealiseerd kunnen worden.

Om toch tot een zo goed mogelijke ontwerpvariant te komen, worden de randvoorwaarden onderverdeeld in harde en bespreekbare randvoorwaarden. Het ideale ontwerp moet de harde randvoorwaarden in acht nemen, maar mag afwijken van de bespreekbare randvoorwaarden.

Na het opstellen van de randvoorwaarden en het programma van eisen, wordt gestart met het ontwikkelen van het Functioneel Ontwerp van het ideale ontwerp, waarin onder andere het aantal rijstroken, het type verbindingswegen, de locatie van discontinuïteiten en de knooppuntconfiguratie worden bepaald. Vervolgens wordt in het Elementair Ontwerp de geometrie van het ideale knooppunt uitgewerkt, waarbij wordt gekeken naar het horizontaal en verticaal alignement van de wegen.

Na de afronding van het Elementair Ontwerp wordt een knelpuntenanalyse uitgevoerd, waarin wordt vastgesteld waar de ideale ontwerpvariant conflicteert met aanvullende ruimtelijke beperkingen (bespreekbare randvoorwaarden) en omgevingsfactoren. Voor deze zogenoemde knelpunten worden oplossingsrichtingen aangedragen om het conflict op te heffen of het ontwerp zodanig aan te passen dat het knelpunt wordt vermeden. Op basis van deze analyse wordt een realistischere ontwerpvariant opgesteld, waarin gerichte ontwerpconcessies aan het ideale ontwerp zijn doorgevoerd om de knelpunten te vermijden.

In de daaropvolgende analyse met microsimulaties worden het huidige ontwerp zonder aanpassingen, de ideale ontwerpvariant en de aangepaste realistische ontwerpvariant geanalyseerd en beoordeeld op het gebied van verkeersveiligheid en doorstroming. De resultaten van deze microsimulaties worden besproken met een verkeersveiligheidsexpert en een verkeersadviseur van Rijkswaterstaat, met als doel om de betrouwbaarheid en toepasbaarheid van microsimulaties binnen het wegontwerpproces te beoordelen.

Op basis van de uitkomsten van dit onderzoek kan Rijkswaterstaat in de nabije toekomst starten met de effectenstudies om tot een voorkeursbeslissing voor het Inpassend Ontwerp te komen, waarna kan worden overgegaan op de volgende fasen van het Kader Wegontwerpproces.

2.1.1 Iteraties in het ontwerpproces

In Figuur 11 is de volgorde van de ontwerpstappen van deze thesis weergegeven. De hoofdlijn wordt aangeduid met zwarte pijlen, terwijl iteratiestappen met rode en blauwe pijlen zijn gemarkeerd.

De eerste iteratiestap vindt plaats tussen het Functioneel Ontwerp (FO) en het overzicht van randvoorwaarden en eisen. Hier wordt gecontroleerd of het FO voldoet aan de gestelde eisen en de

harde randvoorwaarden. Indien nodig kan de ligging van de discontinuïteiten, het rijstrokenschema of de knooppuntvorm (deels) worden gewijzigd, zodat het Functioneel Ontwerp na (kleine) aanpassingen wel voldoet aan het programma van eisen.

De tweede iteratie betreft de overgang tussen het Functioneel Ontwerp (FO) en het Elementair Ontwerp (EO). Hierbij wordt beoordeeld of het EO consistent is met de uitgangspunten van het FO, zoals capaciteit, type verbindingswegen en de ligging van discontinuïteiten. Ook hier kunnen (kleine) aanpassingen aan het horizontaal of verticaal alignement nodig zijn om afstemming te garanderen.

Na de knelpuntenanalyse volgt een derde iteratieve stap, waarin wordt nagegaan of alle knelpunten tussen ruimtelijke beperkingen uit de omgeving en het Elementair Ontwerp daadwerkelijk in beeld zijn gebracht, zodat geen knelpunten worden gemist.

Bij de vierde iteratiestap wordt getoetst of de realistische ontwerpvariant daadwerkelijk rekening houdt met alle geïdentificeerde knelpunten. Als ontwerpconcessies niet zijn uitgewerkt, vanwege ruimte of tijdsbeperkingen, moet deze keuze beargumenteerd worden, zodat een eerste inschatting van de gevolgen hiervan kunnen worden opgesteld.

De laatste iteratie betreft de koppeling tussen de evaluatie van het ontwerp en de resultaten van de micros simulaties met de opgestelde ontwerpvarianten. Deze iteratie is met blauwe pijlen aangegeven, omdat hiermee de gevolgen van de ontwerpconcessies op het gebied van doorstroming en verkeersveiligheid in kaart worden gebracht. Vanwege de beperkte tijd is het echter niet mogelijk om de ontwerpvarianten aan te passen om deze gevolgen te verminderen. De evaluatie van de resultaten en gevolgen vormt de basis voor het vervolgonderzoek naar de volgende ontwerpfasen binnen het Kader Wegontwerpproces van Rijkswaterstaat.

2.1.2 Keuze voor het aanlegproces

Binnen Rijkswaterstaat bestaan twee ontwerpprocessen: één voor aanlegprojecten en één voor vervanging en renovatie (zie Bijlage 1). Aangezien dit onderzoek ingaat op het herontwerp van de Harmsenknoop lijkt het volgen van het renovatieproces de meest logische keuze. Echter is na overleg met een wegontwerp expert van Rijkswaterstaat bewust gekozen om het aanlegproces te volgen (van Alphen, 2025).

De eerste reden hiervoor is dat het renovatieproces in veel gevallen over gaat in het aanlegproces. Dit gebeurt bijvoorbeeld wanneer meer ruimte nodig is, de volledige infrastructuur moet worden vervangen, sprake is van het bereiken van de technische levensduur, of wanneer een aanpassing van de huidige geometrie noodzakelijk is (Rijkswaterstaat, 2019). In dergelijke gevallen wordt alsnog het aanlegproces gevolgd. Voor de Harmsenknoop geldt dat, om een ideaal ontwerp op het gebied van verkeersveiligheid en doorstroming te realiseren, de volledige infrastructuur opnieuw moet worden ingericht. Hierdoor is het volgen van het aanlegproces noodzakelijk.

Ten tweede is gekozen voor het aanlegproces, omdat dit proces vanaf nul start en daarmee de ontwikkeling van een ideaal ontwerp mogelijk maakt, zonder beperkingen door de bestaande infrastructuur van het huidige knooppunt. Pas in latere fasen van het aanlegproces wordt gekeken naar de ruimtelijke inpassing, waardoor eerst de optimale oplossing op het gebied van verkeersveiligheid en doorstroming kan worden uitgewerkt.

Hieronder wordt per stap van de methode, zoals weergegeven in Figuur 11, toegelicht welke aanpak voor dit onderzoek gevolgd gaat worden.

2.2 Probleemanalyse

Voordat het ontwerpproces start, wordt een probleemanalyse uitgevoerd om vast te stellen wanneer en waarom problemen optreden. Daarbij worden zowel de huidige als toekomstige situatie in kaart gebracht.

De analyse van de huidige situatie is gebaseerd op de omgevingsanalyse van Rijkswaterstaat en daarnaast wordt ongevalldata gebruikt om de huidige knelpunten in kaart te brengen. Voor de toekomstige situatie wordt gebruikgemaakt van verwachte ontwikkelingen volgens de prognoses van het Nederlands Regionaal Model (NRM). Op deze manier ontstaat een overzicht van de bestaande tekortkomingen in het huidige ontwerp van de Harmsenknoop en van potentiële toekomstige problemen indien geen maatregelen worden genomen.

Daarnaast is literatuuronderzoek verricht naar verkeersveiligheid bij onder andere scherpe bochten en knooppunten. Hierbij ligt de focus op relevante verkeersveiligheidsparameters, zodat deze in het nieuwe ontwerp kunnen worden meegenomen. Zo kan gericht aandacht worden besteed aan de meest risicovolle aspecten van het ontwerp.

2.3 Uitgangspuntennotitie

Op basis van de probleemanalyse worden in de uitgangspuntennotitie de uitgangspunten voor de toekomstige situatie vastgesteld. Hierbij wordt gekeken naar toekomstige verkeersintensiteiten op de Harmsenknoop en worden de uitgangspunten voor de toekomstige situatie geïnventariseerd.

De toekomstige verkeersintensiteiten per verkeersstroom op de knoop worden bepaald met behulp van het Nederlands Regionaal Model (NRM). Het NRM geeft voor elk wegvak in 2040 een prognose van de verkeersintensiteiten op basis van de verwachte bevolkingsgroei, economische ontwikkelingen en ontwikkeling van het vrachtverkeer.

In overleg met verkeersadviseurs van Rijkswaterstaat is beoordeeld of de voorspelde intensiteiten van het NRM realistisch zijn. Hiervoor worden de actuele intensiteiten uit het INWEVA (Intensiteiten op Wegvakken) geraadpleegd en geanalyseerd. Indien het NRM tekortschiet in de verdeling van verkeer over de verkeersstromen, wordt de huidige verdeling doorgetrokken naar de toekomst. Per verkeersstroom wordt dan berekend welk aandeel van de hoofdstroom via deze route rijdt.

Naast verkeersintensiteiten worden ook andere uitgangspunten voor de toekomstige situatie vastgelegd. Dit betreft onder meer de toekomstige hoogte van de Harmsenbrug (op basis van de regioanalyse van Rijkswaterstaat), de hoogteligging van de Calandbrug en de hoogteligging van de tunnelmond van de Thomassentunnel.

Tot slot worden samen met een omgevingsanalist van Rijkswaterstaat de verwachte ruimtelijke ontwikkelingen rond de Harmsenknoop in kaart gebracht. Voor elk van deze ontwikkelingen wordt aangegeven hoe hiermee in het toekomstige ontwerp rekening wordt gehouden.

2.4 Randvoorwaarden en programma van eisen

Om te voorkomen dat het ideaal ontwerp niet aansluit op bestaande infrastructurele constructies, zoals de Harmsenbrug en Thomassentunnel, worden harde en bespreekbare randvoorwaarden opgesteld. Alle ontwerpvarianten moeten de harde randvoorwaarden in acht nemen, maar de ideale ontwerpvariant mag van de bespreekbare randvoorwaarden afwijken.

De randvoorwaarden en het programma van eisen worden opgesteld aan de hand van de problemen in de huidige en toekomstige situatie en aan de hand van de uitgangspuntennotitie. Hierbij wordt in overleg met een omgevingsanalist en wegontwerp expert bepaald of een randvoorwaarde een harde of bespreekbare randvoorwaarde wordt. Daarnaast wordt het programma van eisen aangevuld met

eisen uit de Richtlijnen Ontwerp Autosnelwegen (ROA) en eisen ten aanzien van de wegcategorie volgens het Handboek Wegontwerp buiten de bebouwde kom (CROW - Wegontwerp BBK, 2025).

2.5 Functioneel Ontwerp

In het Functioneel Ontwerp (FO) worden op basis van de vastgestelde randvoorwaarden en eisen de eerste ontwerpkeuzes voor de ideale ontwerpvariant vastgelegd. Een belangrijk onderdeel hiervan is het rijstrokenschema, dat een overzicht geeft van het aantal rijstroken per rijbaan en de ligging van discontinuïteiten, zoals in- en uitvoegstroken en splitsingen.

Het benodigde aantal rijstroken wordt bepaald op basis van de verhouding tussen de toekomstige verkeersintensiteit (I) en de capaciteit (C), conform het Handboek Capaciteiten Infrastructuur Autosnelwegen (CIA). Hierbij wordt uitgegaan van de norm $\frac{I}{C} \leq 0,8$ (CIA - Rijkswaterstaat, 2024).

De ligging van de discontinuïteiten worden schematisch in het rijstrokenschema weergegeven, waarbij de minimaal benodigde turbulentielenktes volgens de Richtlijnen Ontwerp Autosnelwegen (ROA) worden bepaald. Na het uitwerken van het horizontaal en verticaal alignment in het Elementair Ontwerp wordt gecontroleerd of het ideale ontwerp, vanwege de beperkte ruimte, daadwerkelijk aan de minimale turbulentielenktes voldoet.

De keuzes voor de knooppuntvorm, het type van de verbindingswegen (direct, semi-direct of indirect) en bijbehorende ontwerpnelheden zijn gebaseerd op de knooppuntconfiguraties uit de ROA en zijn afhankelijk van de beschikbare ruimte en het gewenste afwikkelingsniveau.

Verder wordt in het Functioneel Ontwerp een viltstiftenschets opgesteld, waarin de ligging van verbindingswegen, de knooppuntvorm en het ruimtebeslag overzichtelijk worden weergegeven. Deze schets is op schaal en maakt een eerste inschatting mogelijk van de opeenvolging van boogstralen en discontinuïteiten. De grootte van de boogstralen wordt bepaald aan de hand van de ontwerpnelheden en het type verbindingsweg, conform de ROA.

In het Functioneel Ontwerp wordt ook de eerste opzet van de verticale ligging van de verbindingswegen weergegeven. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen een ligging op maaiveld en een verhoogde of verdiepte ligging. Verder wordt het type van de discontinuïteiten (samenvoeging, splitsing of in- of uitvoeging) bepaald aan de hand van het aantal rijstroken en wordt een principeschets van de discontinuïteiten weergegeven.

Voorbeelden van een rijstrokenschema en een viltstiftenschets zijn opgenomen in Bijlage 1.

2.6 Elementair Ontwerp

In het Elementair Ontwerp (EO) wordt de ideale ontwerpvariant verder uitgewerkt tot een geometrisch ontwerp dat binnen de gestelde randvoorwaarden zo goed mogelijk voldoet aan de Richtlijnen Ontwerp Autosnelwegen (ROA). De focus binnen het EO ligt op de ontwerpaspecten die van belang zijn voor microsimulaties. Daarom worden zowel het horizontale en verticale alignment van alle wegen binnen het knooppunt bepaald. Hierbij wordt specifiek gekeken naar boogstralen, overgangsbogen, de benodigde vrije ruimte bij ongelijkvloerse kruisingen en de maximaal toegestane hellingpercentages.

Om de structurele veiligheid van het nieuwe knooppuntontwerp te waarborgen, wordt gewerkt volgens het Handboek Wegontwerp buiten de bebouwde kom van Kennisplatform CROW (CROW, 2024) en volgens de Richtlijnen Ontwerp Autosnelwegen (ROA) voor auto(snel)wegen (ROA, 2019).

Om het Elementair Ontwerp vorm te geven, wordt een stromenanalyse toegepast. Hierbij worden eerst de grootste en belangrijkste verkeersstromen ingepast, waarna het ontwerp stapsgewijs wordt

uitgebreid met de kleinere verkeersstromen. Deze aanpak bevordert een efficiënte ruimtelijke indeling, waarbij de hoofdroutes als uitgangspunt dienen voor de verdere detaillering.

Daarnaast wordt een eerste inschatting gemaakt van het dwarsprofiel van de wegen. Hierbij wordt gekeken naar de breedtes van rijstroken, vluchtstroken, redresseerstroken en de middenberm, evenals de benodigde ruimte voor voertuigkeringen.

Verder wordt in het Elementair Ontwerp gecontroleerd of het ideale ontwerp voldoet aan de minimale turbulentieafstanden tussen opeenvolgende discontinuïteiten. Deze minimale turbulentieafstanden zijn vastgesteld in Tabel 6.6 van de ROA.

2.7 Knelpuntenanalyse

In de knelpuntenanalyse wordt het Elementair Ontwerp (EO) van de ideale ontwerpvariant geconfronteerd met aanvullende ruimtelijke beperkingen en bespreekbare randvoorwaarden. Dit gebeurt door het EO te projecteren op de situatietekening van de bestaande situatie, waardoor ruimtelijke knelpunten tussen de omgeving en de ideale ontwerpvariant zichtbaar worden.

Er wordt specifiek gekeken naar de knelpunten die ontstaan wanneer de ideale ontwerpvariant moet voldoen aan de bespreekbare randvoorwaarden. Voor elk geïdentificeerd knelpunt wordt beoordeeld of dit kan worden opgelost zonder aanpassing van het ontwerp, bijvoorbeeld door het knelpunt op te heffen of te verplaatsen. Indien dat niet mogelijk blijkt, wordt een oplossing in de vorm van een concessie aan het ideale ontwerp voorgesteld. Deze concessie wordt doorgevoerd in de realistische ontwerpvariant, waarin het alignement van de ideale ontwerpvariant wordt aangepast om het knelpunt te vermijden.

2.8 Opstellen realistische ontwerpvariant met ontwerpconcessies

In deze stap wordt de realistische ontwerpvariant opgesteld door het alignement van de ideale ontwerpvariant aan te passen en zo de geïdentificeerde knelpunten te vermijden. Dit kan bijvoorbeeld leiden tot wijzigingen in boogstralen en verticale liggingen. Het is essentieel dat de onderdelen van het horizontale en verticale alignement die afwijken van de ideale ontwerpvariant, worden ontworpen op basis van de geldende ontwerprichtlijnen (ROA en CROW). Wanneer als gevolg van een ontwerpconcessie van deze richtlijnen moet worden afgeweken, dient dit duidelijk te worden onderbouwd en toegelicht.

Door alle ontwerpconcessies samen te voegen, ontstaat een realistische ontwerpvariant die beter aansluit bij de ruimtelijke context. In de volgende stap worden de ontwerpvarianten en bijbehorende concessies beoordeeld op verkeersveiligheid en doorstroming met behulp van microsimulaties.

2.9 Analyse van ontwerpvarianten en concessies met microsimulaties

In deze stap worden met microsimulaties het huidige ontwerp zonder aanpassingen, de ideale ontwerpvariant en de aangepaste realistische ontwerpvariant geanalyseerd en beoordeeld op het gebied van verkeersveiligheid en doorstroming. Deze simulaties zijn essentieel, omdat het ontwerp nog niet bestaat en omdat ze nodig zijn om inzicht te krijgen in de toekomstige verkeerssituatie en verkeersveiligheid. De verkregen gegevens worden in de volgende stap gebruikt om samen met een verkeersadviseur en verkeersveiligheidsexpert van Rijkswaterstaat de betrouwbaarheid en toepasbaarheid van de microsimulaties te beoordelen.

Voor de analyse van de toekomstige verkeerssituatie en de bijbehorende aspecten voor de doorstroming en verkeersveiligheid kunnen onder andere de microsimulatie software Paramics en SSAM worden gebruikt.

Paramics

Paramics maakt het mogelijk om microsimulaties van verkeer te genereren, waarbij het gedrag van individuele voertuigen wordt nagebootst en verkeersbewegingen kunnen worden gevisualiseerd en geanalyseerd (Systra, z.d.). Met Paramics is het mogelijk om per wegvak het aantal voertuigen, de gemiddelde snelheid en reistijd te bepalen. Deze gegevens vormen de basis voor de beoordeling van de doorstromingsaspecten van de ontwerpvarianten en bijbehorende concessies.

Het is van groot belang dat het microsimulatiemodel in Paramics goed wordt gekalibreerd, zodat het representatief is voor de werkelijke verkeersomstandigheden en het gedrag van weggebruikers. In Paramics wordt het model gekalibreerd met ingebouwde systemen, zodat het rijgedrag realistisch wordt gerepresenteerd (Systra, z.d.).

Bij de kalibratie houdt Paramics rekening met:

- **Parameters voor rijgedrag:** deze parameters bepalen hoe voertuigen zich gedragen in het verkeer en worden aangepast om het gedrag van bestuurders te simuleren.
 - Wiedemann-auto-volg-parameters worden gebruikt om het volg- en inhaalgedrag van voertuigen te modelleren. Voorbeeld parameters zijn: volgafstand, afstand bij stilstaan, variatie in volgafstand en drempelwaarden voor acceleratie en deceleratie.
 - Baanwisselingsparameters worden gebruikt om te bepalen hoe voertuigen van rijstrook wisselen. Voorbeeld parameters zijn: maximale deceleratie voor baanwisseling en veiligheidsafstand met andere voertuigen.
 - Rijgedrag in bochten wordt met behulp van de snelheidsafname van bestuurders, de boogstraal en verkanting gekalibreerd.
- **Parameters voor verkeersstromen:** deze parameters definiëren de kenmerken van het verkeer in het model.
 - Voertuigtypes en -categorieën worden gebruikt om de verschillende voertuigen met hun eigen snelheidsprofielen weer te geven. Bijvoorbeeld het aandeel van het vrachtverkeer en de acceleratie en deceleratie van voertuigen.
 - Snelheidsdistributieparameters worden gebruikt om de gemiddelde snelheid van voertuigen en de variatie in snelheid weer te geven.
- **Netwerkparameters:** deze parameters classificeren de fysieke inrichting van het wegennetwerk. Voorbeelden zijn het aantal rijstroken, de hoogteligging van wegvakken, de lengte van in- en uitvoegstroken, boogstralen en hellingen.

Daarnaast wordt de kalibratie van het model van het huidige ontwerp gecontroleerd met een significantietoets. Hierbij worden de berekende intensiteiten in het model (modelwaarden) vergeleken met de daadwerkelijke telgegevens van de wegvakken van de Harmsenknoop in de realiteit (telwaarden). De toets berekent een statistische waarde voor de mate van afwijking tussen de model- en telwaarden. Wanneer de T-waarde kleiner is dan 3,5, wordt het resultaat als goed en acceptabel beschouwd (Sweco, 2017). Dit betekent dat het model in dat geval voldoende is gekalibreerd.

SSAM

SSAM staat voor Surrogate Safety Assessment Model en met deze software kan de veiligheid van wegen bepaald worden voordat ongelukken gebeuren. Dit gebeurt aan de hand van gegevens van voertuigtrajecten, die bijvoorbeeld gegenereerd kunnen worden met Paramics, waarna SSAM automatisch een conflictenanalyse uitvoert (U.S. Department of Transportation, z.d.). Er is gekozen voor SSAM, omdat deze software verschillende aspecten van veiligheidsproblemen identificeert zonder dat daadwerkelijk ongevallen plaatsvinden.

Op basis van de conflictenanalyse van SSAM worden gegevens over potentiële gevaarlijke situaties verzameld. Deze gegevens vormen de basis voor de beoordeling van de verkeersveiligheidsaspecten van de ontwerpvarianten en concessies.

Dit wordt gedaan aan de hand van conflictparameters en verschillende type conflicten:

- **Conflictparameters** worden gebruikt om conflicten te identificeren. Conflicten zijn situaties waarbij twee voertuigen elkaars pad kruisen met een verhoogde kans op een botsing.
 - Time to Collision (TTC) (= tijd tot botsing) staat voor de minimale tijd tot een botsing tussen twee voertuigen, als ze doorgaan met hun huidige snelheid en richting. Hoe lager de TTC, hoe gevaarlijker de situatie. Een drempelwaarde kan worden gebruikt om conflicten te definiëren. SSAM gebruikt een drempelwaarde van $TTC \leq 1,5$.
 - Snelheidsverschil (DeltaS) is het verschil in snelheid tussen twee voertuigen in een conflict. De kans op ernstige gevolgen is groter, als het snelheidsverschil groter is.
 - Post-Encroachment Time (PET) (= tijd na inbreuk) is de tijd die verstrijkt tussen het verlaten van een kritieke ruimte door één voertuig en het betreden van deze ruimte door een ander voertuig. Hierbij wijst een kleinere waarde voor PET op een grotere kans op een conflict.
- **Type conflicten** worden gebruikt om conflicten op basis van hun aard en locatie te categoriseren.
 - Baanveranderingsconflicten (= lane change conflicten) staan voor conflicten bij rijstrookwisselingen, zoals invoegen of uitwijken.
 - Kop-staartbotsingen (= rear end conflicten) worden vaak veroorzaakt door abrupt remmen. Dit zal een rol spelen bij het remmen voor de bochten van het knooppunt.
 - Kruispuntconflicten (= crossing conflicten) zijn conflicten bij voorrangkruispunten, waarbij bestuurders zelf een geschikt moment moeten vinden om het kruispunt te passeren.

Om conflicten binnen een verkeersnetwerk te identificeren, kan SSAM met behulp van een hittekaart gebieden met een hoge conflictenintensiteit visualiseren. Hierdoor kan de verkeersveiligheid zowel numeriek als visueel worden geanalyseerd, wat helpt bij het identificeren van gebieden met verhoogde risico's. Dit maakt het mogelijk om de ontwerpvarianten en concessies zowel kwantitatief als kwalitatief te beoordelen.

2.10 Uitkomsten van microsimulatie evalueren

De resultaten van de microsimulaties worden geëvalueerd via interviews met een verkeersadviseur en een verkeersveiligheidsexpert, voor respectievelijk de doorstromings- en verkeersveiligheidsaspecten. Het doel is om met vooraf opgestelde vragen de betrouwbaarheid en toepasbaarheid van microsimulaties binnen het wegontwerpproces te beoordelen. De precieze invulling hangt af van de beschikbare resultaten, maar mogelijke vragen zijn:

- Wat zijn de sterke en zwakke punten van de gebruikte microsimulatie?
- Geeft de microsimulatie voldoende informatie voor een verkeersveiligheidsanalyse, of ontbreken aspecten die een expert handmatig zou moeten bepalen? Welke?
- Zou het werk van experts veranderen als voor elke verkeersveiligheidsbeoordeling SSAM wordt gebruikt?

Voor de evaluatie zijn minimaal twee experts nodig: een verkeersadviseur met kennis van de microsimulatie software Paramics en een verkeersveiligheidsexpert met ervaring in het kwalitatief beoordelen van wegontwerpen. Zo kunnen de doorstromingsresultaten met de verkeersadviseur worden besproken en de verkeersveiligheidsparameters met de verkeersveiligheidsexpert. De experts worden via Rijkswaterstaat benaderd, waarbij binnen de organisatie geschikte kandidaten worden gezocht.

Hoewel de evaluatie slechts op één expert per kennisgebied berust, wordt verwacht dat deze voldoende expertise hebben om een eerste inschatting van de geschiktheid van microsimulaties voor het beoordelen van verkeersveiligheid en doorstroming te maken. Daarnaast wordt onderzocht of de simulaties nieuwe inzichten opleveren of juist belangrijke informatie missen. Deze eventuele ontbrekende gegevens vormen de basis voor vervolgonderzoeken.

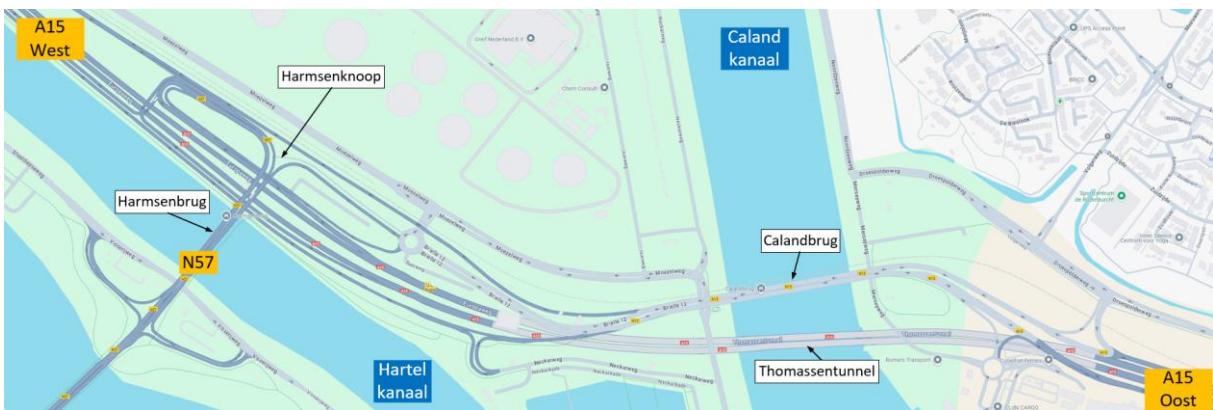
Op basis van deze evaluatie kan worden geconcludeerd in hoeverre microsimulaties een realistisch en gedetailleerd beeld geven van de effecten van ontwerpconcessies en of zij kunnen dienen als aanvulling op of als alternatief voor expertbeoordelingen binnen het wegontwerpproces.

3. Probleemanalyse

De Harmsenknoop vormt een complexe verkeersverbinding tussen de N57, A15, Moezelweg en de route over de Calandbrug. Door scherpe bochten, hoogteverschillen en beperkte ruimte wijkt het huidige ontwerp sterk af van standaard knooppuntontwerpen. Zo moeten bestuurders die de A15 richting de Maasvlakte verlaten en naar de N57 richting Middelburg willen rijden, sterk afremmen om een scherpe bocht met een snelheid van slechts 30 km/h te nemen. Dit leidt tot beperkingen in de doorstroming en verhoogt het risico op ongevallen, zoals blijkt uit de ongevallencijfers (VIA - Rijkswaterstaat, 2024). Voordat de huidige en toekomstige problemen van de Harmsenknoop worden geanalyseerd, wordt de huidige situatie van de Harmsenknoop in kaart gebracht.

3.1 Huidige situatie Harmsenknoop

De Harmsenknoop verbindt de A15, die loopt van de Maasvlakte via Hoogvliet en Ridderkerk tot aan Bommel, met de N57, die zich uitstrekt van Middelburg tot aan de Harmsenknoop. Om de verschillende verkeersstromen op de Harmsenknoop te verduidelijken, wordt in dit onderzoek onderscheid gemaakt tussen verkeer afkomstig van de A15 vanaf de Maasvlakte (A15 West) en verkeer dat vanuit Ridderkerk komt (A15 Oost). Daarnaast wordt het verkeer van en naar de N57 gelabeld met N57. De huidige situatie van de Harmsenknoop is weergegeven in Figuur 12 en in deze figuur zijn in het oranje de labels van de verschillende verkeersstromen op de juiste locatie aangegeven.



Figuur 12: Huidige situatie Harmsenknoop met de labels van de verkeersstromen (Google Maps, z.d.)

Het verkeer op de A15 kan het Calandkanaal oversteken via zowel de Thomassentunnel als de Calandbrug. Hierdoor wordt het verkeer vanuit de A15 Oost verdeeld over beide overgangen.

Deze splitsing van het verkeer vanaf de A15 Oost zorgt ervoor dat de Harmsenknoop via vier hoofdwegen bereikbaar is, namelijk via de N57, A15 West, de Calandbrug en de Thomassentunnel. Het verkeer kan de Harmsenknoop ook via deze vier routes verlaten. Dit resulteert in tien mogelijke routes over de Harmsenknoop, wat leidt tot de volgende verkeersstromen:

1. A15 West → Calandbrug
2. A15 West → Thomassentunnel
3. A15 West → N57
4. Calandbrug → A15 West
5. Calandbrug → N57
6. N57 → Calandbrug
7. N57 → Thomassentunnel
8. N57 → A15 West
9. Thomassentunnel → A15 West
10. Thomassentunnel → N57

Deze verschillende routes over de Harmsenknoop zijn weergegeven in de figuren in Bijlage 2.

De huidige intensiteit-capaciteit verhouding (I/C-verhouding) van elk wegvak van het hoofdwegenet wordt berekend met behulp van het Nederlands Regionaal Model (NRM). Het huidige model is gebaseerd op het jaar 2018 en berekent de I/C-verhouding door de telcijfers van de verkeersintensiteiten in 2018 te delen door de capaciteit van bijbehorende wegvakken. De I/C-verhoudingen van de wegvakken op en rond de Harmsenknoop zijn weergegeven in Bijlage 3.

Volgens het NRM varieert de I/C-verhouding voor de verkeersstromen op de Harmsenknoop tijdens de ochtendspits van 2018 tussen 0,3 en 0,5 (NRM - Rijkswaterstaat, 2018). Er zijn echter twee uitschieters: de verkeersstroom van de A15 Oost via de Calandbrug heeft een I/C-verhouding van 0,1, terwijl de verkeersstroom van de N57 via de Calandbrug naar de A15 Oost een I/C-verhouding van 0,7 heeft. Voor de avondspits van 2018 ligt de I/C-verhouding tussen 0,2 en 0,4, met als uitzondering de verkeersstroom van de A15 West naar de N57, die een I/C-verhouding van 0,7 laat zien (NRM-Rijkswaterstaat, 2018).

Aangezien de I/C-verhoudingen van de Harmsenknoop in het basisjaar 2018 volgens het NRM onder de 0,8 liggen, wordt aangenomen dat deze verhouding ook in de huidige situatie (2023 – 2025) onder de 0,8 blijft. Hoewel dit lijkt te wijzen op voldoende capaciteit voor de huidige verkeerssituatie, is het van belang om op te merken dat de I/C-verhouding niet alle aspecten van doorstroming en verkeersveiligheid in acht neemt.

Zo zijn de I/C-verhoudingen gebaseerd op gemiddelden per uur, waardoor kortdurende momenten van congestie niet zichtbaar zijn in deze cijfers. Daarnaast houdt het NRM onvoldoende rekening met de effecten van de scherpe bochten in het huidige ontwerp, wat kan betekenen dat de gepresenteerde I/C-verhoudingen een te optimistisch beeld geven. De volgende paragraaf gaat daarom in op de verkeersveiligheids- en doorstromingsproblemen van de huidige Harmsenknoop, die aantonen waarom een nieuw ontwerp van de Harmsenknoop noodzakelijk is.

3.2 Problemen met huidige Harmsenknoop

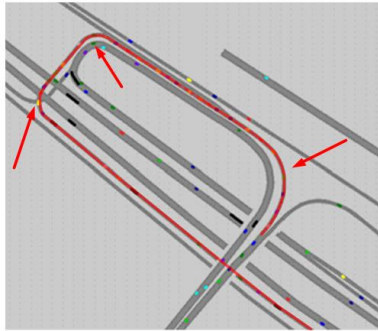
In 2014 hebben Rijkswaterstaat en Goudappel Coffeng gezamenlijk onderzoek gedaan naar de verkeersafwikkeling van de N57 en de Harmsenknoop. Ook toen bestond al geruime tijd zorg over de vraag of de Harmsenknoop de verwachte toename van het verkeer kan blijven verwerken (Rijkswaterstaat & Goudappel Coffeng, 2014).

De studie uit 2014 richtte zich op de gevolgen voor de doorstroming op de Harmsenknoop door de verwachte verkeerstoename door het verbeteren van de kruispunten op de N57 en de realisatie van de Blankenburgverbinding in 2024.

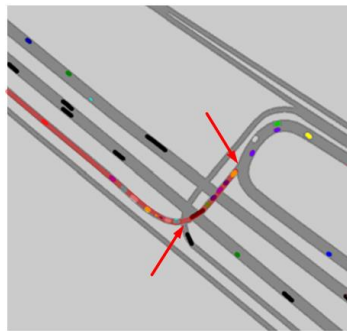
Op basis van dit onderzoek uit 2014 kan een eerste beeld worden gevormd van de huidige knelpunten op de Harmsenknoop in 2025. De simulaties van Rijkswaterstaat en Goudappel Coffeng laten de volgende knelpunten zien (Rijkswaterstaat & Goudappel Coffeng, 2014):

- De enkelstrooks verbindingslus tussen de N57 en de A15 Oost heeft onvoldoende capaciteit in de ochtendspits, wat leidt tot fileterugslag op de N57.
- Het voorrangskruispunt voor verkeer van de A15 West naar de N57 veroorzaakt file, doordat dit verkeer voorrang moet verlenen aan het verkeer van de A15 Oost richting de N57.
- De uitvoegstrook van de A15 Oost, direct na de Thomassentunnel richting de N57, heeft in de avondspits onvoldoende capaciteit.

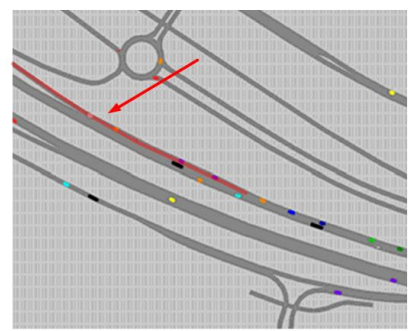
Deze knelpunten zijn in het rood weergegeven in Figuur 13.



Enkelstrooks lus N57 - A15



Voorrangskruispunt A15 west - N57



Uitvoeger A15 naar N57

Figuur 13: De knelpunten van de Harmsenknoop, weergegeven in het rood (Rijkswaterstaat & Goudappel Coffeng, 2014)

Knelpunt van de uitvoeger A15 Oost naar de N57

Voor het laatstgenoemde knelpunt, de uitvoegstrook van de A15 Oost, is in 2025 inmiddels een maatregel doorgevoerd om dit probleem te minimaliseren. Er is een taperuitvoeging toegevoegd aan de uitvoegstrook, waardoor de lus van de A15 Oost naar de N57 is verbreed van één naar twee rijstroken. Wanneer deze rijstrooktoevoeging met een verkeersveiligheidsexpert van Rijkswaterstaat wordt besproken, blijkt dat deze extra rijstrook het verkeersveiligheidsprobleem in de daaropvolgende scherpe bocht vergroot (Visser, 2025). Na de uitvoegstrook blijven deze twee rijstroken namelijk parallel aan de A15 lopen, waardoor dit wegvak meer op de snelweg dan op een uitvoeger lijkt. De extra rijstrook vergroot dit effect, waardoor de bestuurders langer op hoge snelheid blijven doorrijden, terwijl het verkeer geleidelijk hoort af te remmen voor de aankomende scherpe bocht om 180 graden te draaien (Visser, 2025). Dit leidt tot forse remvertragingen vlak voor de scherpe bocht, doordat bestuurders op de uitvoeger moeten afremmen van 100 km/h naar 30 km/h. Een tweede verkeersveiligheidsexpert van Rijkswaterstaat beweert dat deze grote snelheidsverlaging de kans op kop-staartbotsingen vergroot (Ramsaran, 2025). Dit wordt onderbouwd door de ongevallendata, waaruit blijkt dat hier vijf ongevallen in de afgelopen elf jaar hebben plaatsgevonden (VIA - Rijkswaterstaat, 2024).

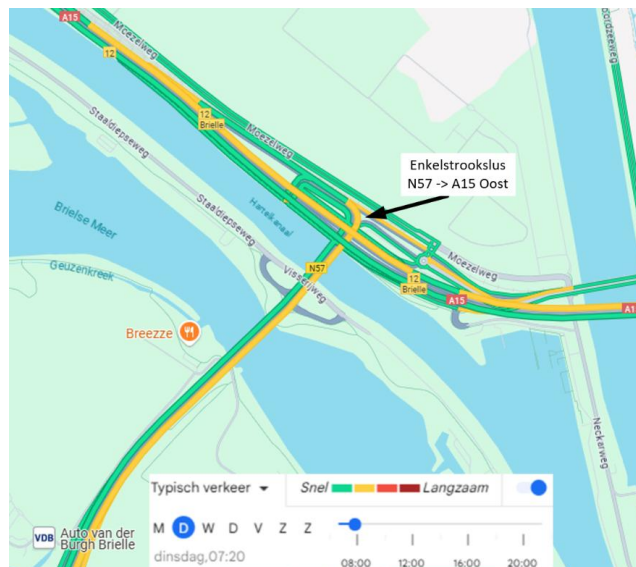
Daarnaast ontstaat door de steile helling voor de bocht een parallaxeffect, omdat de windmolens stroomafwaarts parallel aan de A15 blijven lopen, waardoor de scherpe bocht onverwacht voor weggebruikers opduikt. Figuur 14 laat het zicht van de bestuurders vlak voor de scherpe bocht zien, hierbij valt het op dat de bocht zelf verscholen ligt op de helling. De verkeersveiligheidsexperts van Rijkswaterstaat geven aan dat dit resulteert in onvoldoende wegverloopzicht en stopzicht vanwege de combinatie van de helling en de scherpe boog, waardoor dit de verkeersveiligheidsproblemen op dit deel van de Harmsenknoop vergroot (Ramsaran & Visser, 2025).



Figuur 14: Zicht van bestuurders vlak voor de scherpe bocht op de uitvoeger van A15 naar N57 (Street View - Google Maps, z.d.)

Knelpunt enkelstrooks verbindingslus N57 naar A15 Oost

Op de tegengestelde rijrichting, van de N57 naar de A15 Oost, blijft de enkelstrooks verbindingslus volgens verkeersdeskundigen van Rijkswaterstaat ook in 2025 zorgen voor file op de N57 (de Bruijn & van Rongen, 2025). File is een verzamelnaam voor drie soorten stagnerend verkeer, namelijk stilstaand verkeer (snelheid lager dan 25 km/h), stilstaand tot langzaam rijdend verkeer (combinatie van de twee) en langzaam rijdend verkeer (snelheid van 25 tot 50 km/h) (Rijkswaterstaat, 2025). De file op de N57 wordt bevestigd door het overzicht van het langzaam rijdend verkeer in het onderdeel Typisch Verkeer van Google Maps. Voor de ochtendspits in 2025 is in Figuur 15 een kaart van het langzaam rijdend verkeer weergegeven. Hierin is te zien dat de krappe lussen in de aansluiting van de N57 naar de A15 Oost op de N57 zorgen voor file. Deze file komt volgens de experts van Rijkswaterstaat doordat men op de N57 vroeg op de linker rijstrook wil voorsorteren om de verbindingsweg naar de A15 en de Thomassentunnel te nemen (de Bruijn & van Rongen, 2025).



Figuur 15: Overzicht langzaam rijdend verkeer in de ochtendspits van 2025. Door de krappe bogen in de verbindingslus tussen de N57 en de A15 Oost ontstaat file op de N57 (Google Maps, 2025)

Naast de doorstromingsproblemen van het enkelstrooks verbindingslus van de N57 naar de A15 Oost, kent dit knelpunt net na de Harmsenknoop volgens de verkeersveiligheidsexperts van Rijkswaterstaat ook problemen met de verkeersveiligheid. Zo ontstaan net na de Harmsenbrug en vlak voor de linksdraaiende boog naar de A15 Oost en de rechtsdraaiende boog naar de rotonde bij de Moezelweg kop-staartbotsingen, omdat bestuurders flink moeten vertragen voor de bogen (Visser, 2025). Dit probleem wordt versterkt doordat bestuurders te lang 100 km/h op de N57 blijven rijden, terwijl snelheidslimiet voor de Harmsenbrug wordt gereduceerd tot 80 km/h.

Daarnaast ontstaat bij dit knelpunt een vergrote kans op flankongevallen wanneer de Calandbrug wordt geopend om schepen te laten passeren. De bestuurders op de N57 kunnen namelijk vanaf de Harmsenbrug zien of de Calandbrug open gaat en wisselen dan op het laatste moment van rijstrook om het Calandkanaal via de Thomassentunnel te passeren (Visser, 2025). Deze flankongevallen hebben samen met de kop-staartbotsingen voor twaalf ongevallen in de afgelopen elf jaar gezorgd (VIA - Rijkswaterstaat, 2024).

Knelpunt van de voorrangskruisingen op de verbindingsweg A15 West → N57

De verbindingsweg van de A15 West naar de N57 kent twee voorrangskruisingen. Bij de eerste kruising moet het verkeer voorrang verlenen aan het verkeer van de N57 naar de Thomassentunnel en bij de tweede kruising aan het verkeer van de Thomassentunnel naar de N57. Dit leidt zowel in de ochtend- als avondspits tot doorstromingsproblemen, doordat de verkeerstromen van de N57 naar de

Thomassentunnel (voorrangskruising 1) in de ochtendspits een hoge intensiteit kent, terwijl de verkeersstroom van de Thomassentunnel naar de N57 (voorrangskruising 2) in de avondspits maatgevend is (de Bruijn & van Rongen, 2025).

Daarnaast doen zich bij deze voorrangskruisingen ook verkeersveiligheidsproblemen voor. Door de lange wachttijden nemen bestuurders op de afrit van de A15 West namelijk meer risico bij het zoeken naar een geschikt moment om de verkeersstromen te kruisen (Ramsaran, 2025). Dit heeft voor zeven ongevallen in de afgelopen elf jaar gezorgd (VIA - Rijkswaterstaat, 2024).

Relevante verkeersveiligheidsparameters uit de literatuur

Naast de verkeersveiligheidsproblemen op de Harmsenknoop die naar voren kwamen bij de besprekingen met de experts van Rijkswaterstaat, is in de literatuur ook informatie gevonden over relevante verkeersveiligheidsparameters bij knooppuntontwerpen.

Zo toonde McCart et al. in 2004 al aan dat knooppunten bekend staan als gevoelige gebieden voor ongevallen binnen het snelwegennet. Dit komt door de hoge turbulentie en vergrootte aantallen van baanveranderingen en snelheidsvariëaties (McCartt & et al., 2004). Ook Li et al. en Calvi et al. beweren dat knooppunten meer gevoelig zijn voor ongevallen dan basisstukken van de snelweg. Dit komt volgens Li et al. doordat knooppunten meer verkeersconflicten bevatten (Li & et al., 2016) en volgens Calvi et al. komt dat door de meer onvoorspelbare verkeersstromen en variëaties in verkeersdichtheden (Calvi & et al., 2011). Daarom moet bij knooppunten het onderzoek naar de werklast van de bestuurder gefocust zijn op de impact van verkeerscondities (Hu & et al., 2020).

De werklast van een bestuurder is een combinatie van het voortdurend verwerken van weg- en verkeersinformatie en het aanpassen van de toestand van het voertuig op basis van deze informatie (Hu & et al., 2020). De capaciteit van een bestuurder om informatie te verwerken en een voertuig te besturen, wordt echter beperkt door de grenzen van het menselijk brein. Wanneer de omstandigheden te complex worden, raakt deze capaciteit overbelast en kan belangrijke informatie over het hoofd worden gezien. Dit kan leiden tot gevoelens van druk en stress, en daarmee de kans op een ongeval vergroten (Heger, 1998). Daarnaast kan een toename van de werklast van de bestuurder resulteren in een afname van de rijvaardigheid (Jamson & et al., 2014) en bevestigt het onderzoek van Da Silva in 2014 dat het risico op ongevallen en de werklast van de bestuurder sterk gerelateerd zijn aan elkaar (Da Silva, 2014).

Ook boogstralen hebben invloed op de werklast van bestuurders. Zo blijkt uit onderzoek van Hu et al. in 2020 dat bochten met een boogstraal kleiner dan 1000 meter de werklast van de bestuurder vergroot en een invloed heeft op de variëatie van het hartritme van de bestuurder (Hu & et al., 2020).

Daarnaast hebben boogstralen en het horizontale alignement van de weg invloed op snelheden van voertuigen in bochten en op de verkeersveiligheid. Volgens onderzoek van Farah et al. in 2016 komt dit door de extra centrifugale krachten die op voertuigen werken in een bocht, waardoor bestuurders vaak hun snelheden aanpassen bij het naderen van bochten. Deze snelheidsveranderingen kunnen leiden tot een verhoging van de turbulentie op de weg en tot kritische situaties (Farah & et al., 2016).

Door de complexe indeling van de huidige Harmsenknoop met scherpe bochten en steile hellingen, is de werklast van de bestuurders op de knoop groot. De taken variëren van zoeken naar de juiste route en bijbehorende baanveranderingen tot aan het inschatten van de scherpe bochten en het fors afremmen voor de bocht. In lijn met de bevindingen uit de literatuur, waarin is aangetoond dat een hoge werklast van de bestuurder en scherpe bochten leiden tot kritische situaties en ongevallen, blijkt ook uit de ongevallen data dat de Harmsenknoop helaas te maken heeft met veel ongevallen. Zo hebben op de Harmsenknoop in totaal 39 ongevallen plaatsgevonden in de afgelopen elf jaar (VIA - Rijkswaterstaat, 2024).

Het hoge aantal ongevallen op de Harmsenknoop, samen met de genoemde verkeersveiligheids- en doorstromingsproblemen laten zien dat het huidige ontwerp onvoldoende verkeersveilig is. Indien geen maatregelen worden genomen om de Harmsenknoop te verbeteren, zullen de problemen in de toekomst toenemen. De volgende paragraaf gaat in op de verwachte toekomstige problemen van de Harmsenknoop indien het huidige ontwerp niet verbeterd wordt.

3.3 Toekomstige situatie en toekomstige problemen Harmsenknoop

Om een beeld te krijgen van de toekomstige situatie van de Harmsenknoop, wordt gekeken naar de te verwachten ontwikkelingen in de omgeving en naar de prognoses van het Nederlands Regionaal Model (NRM). Het NRM berekent de verkeersintensiteiten voor het prognosejaar 2040, waarbij de verwachte ontwikkelingen zijn doorgerekend met het bestaande vastgestelde beleid (NRM - Rijkswaterstaat, z.d.).

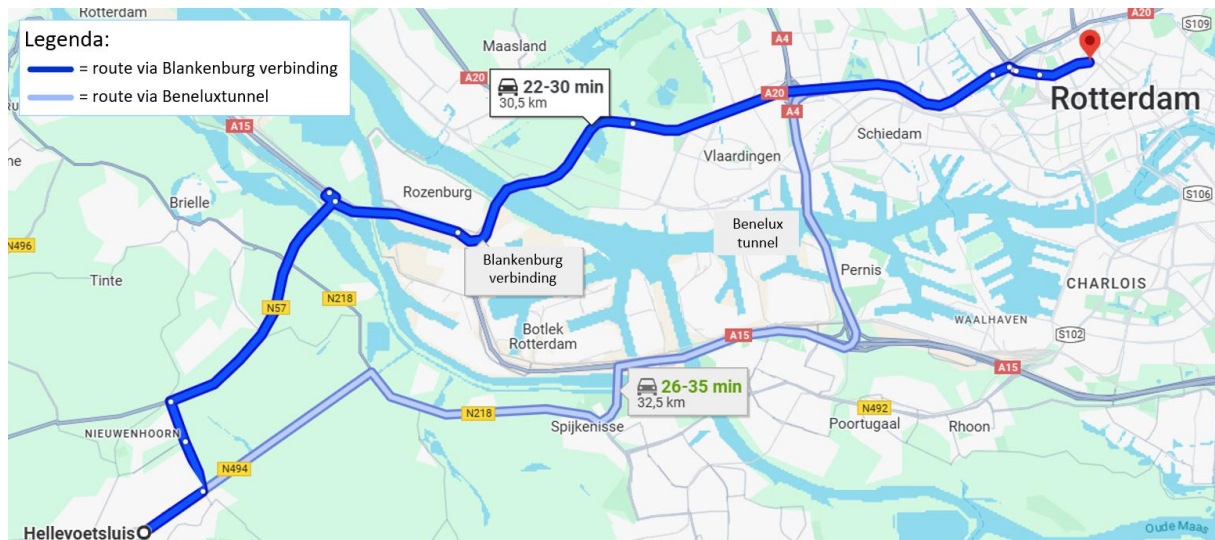
Het model houdt rekening met economische, demografische en mobiliteitsontwikkelingen, en met veranderingen in reisgedrag en de toekomstnetwerken van wegen en openbaar vervoer. Op basis van deze factoren stelt het NRM twee scenario's op: Scenario Hoog en Scenario Laag, zodat zowel een hoge als lage impact van ontwikkelingen kan worden doorgerekend.

Voor dit onderzoek wordt gewerkt met Scenario Hoog, aangezien het herontwerp van de Harmsenknoop ook in de drukst denkbare situatie moet kunnen functioneren. Uit het NRM blijkt dat het verkeer op de vier hoofdassen rond de Harmsenknoop (A15 West, Calandbrug, N57 en Thomassentunnel) in 2040 aanzienlijk toeneemt. De verwachte verkeersintensiteiten voor 2040 worden geanalyseerd in Hoofdstuk 4 Uitgangspuntennotitie.

Een belangrijke ontwikkeling ten opzichte van 2023 is de realisatie van de Blankenburgverbinding, die in 2040 volledig in gebruik is. Deze verbindt de A20 bij Vlaardingen met de A15 bij Rozenburg (Rijkswaterstaat, 2024). Vanwege de recente opening in december 2024 zijn momenteel nog weinig gegevens beschikbaar over de werkelijke verkeersintensiteiten op de Blankenburgverbinding. Toch is het zeer aannemelijk dat de Blankenburgverbinding zal leiden voor een (forse) toename van verkeer op zowel de N57 als de Harmsenknoop. Zo blijkt uit het tracébesluitrapport van de Blankenburgverbinding, waarin onder andere naar de verwachte verschuivingen in verkeersstromen als gevolg van de realisatie van de verbinding zijn geanalyseerd, dat het verkeer op de A15 ter hoogte van Rozenburg met 18% toeneemt ten opzichte van de situatie zonder Blankenburgverbinding (Rijkswaterstaat, 2015).

Deze verkeerstoename is onder andere het gevolg van het feit dat de Blankenburgverbinding het aantrekkelijker maakt om vanuit Hellevoetsluis via de N57, de Harmsenknoop en de Blankenburgverbinding naar de noordzijde van de regio Rotterdam te reizen. Deze route vormt namelijk een aantrekkelijk alternatief voor de bestaande route via de Groene Kruisweg en de A4 (Beneluxtunnel). Figuur 16 toont beide routes en laat zien dat de route via de Blankenburgverbinding zowel korter als sneller is.

Naast de opening van de Blankenburgverbinding neemt het verkeer in 2040 ook toe als gevolg van de realisatie van de 2^e Maasvlakte en ruimtelijke ontwikkelingen in Brielle, Zwartewaal en Geervliet (Rijkswaterstaat & Goudappel Coffeng, 2014). Daarnaast wordt een overbelasting van de Kanaaldijk West (N494) voorspeld, wat naar verwachting zal leiden tot een aanzienlijke toename van het verkeer op de N57 en de Harmsenknoop.



Figuur 16: Routes via de Blankenburgverbinding en de Beneluxtunnel met bijbehorende reistijden (Google Maps, z.d.)

Indien de toekomstige capaciteit van de Harmsenknoop gelijk blijft aan de huidige capaciteit, zal de intensiteit-capaciteit verhouding toenemen door de toename van de verkeersintensiteit op de Harmsenknoop in 2040. Dit vergroot de kans op filevorming, waarbij tevens opstoppingen kunnen ontstaan op de A15 Oost, N57 en op het onderliggende wegennet (de Bruijn & van Rongen, 2025). Daarnaast kan de sterke toename van verkeer op de A15 ertoe leiden dat invoegen moeilijker wordt, waardoor de kans op flankongevallen toeneemt (Ramsaran, 2025).

Wanneer geen maatregelen worden genomen om het huidige ontwerp van de Harmsenknoop te verbeteren, zullen de problemen op het gebied van doorstroming en verkeersveiligheid in de toekomst toenemen. Om de huidige knelpunten op te lossen en voorbereid te zijn op toekomstige ontwikkelingen, is het noodzakelijk een nieuw ontwerp voor de Harmsenknoop te ontwikkelen. Zo wordt verzekerd dat het verkeer zowel nu als in de toekomst het knooppunt op een veilige en efficiënte wijze kan passeren.

In het volgende hoofdstuk worden de uitgangspunten voor het toekomstige ontwerp beschreven.

4. Uitgangspuntennotitie

Na de probleemanalyse gaat het wegontwerpproces verder met de uitgangspuntennotitie, waarin de uitgangspunten voor het toekomstige ontwerp van de Harmsenknoop worden vastgesteld. In dit hoofdstuk worden eerst de verwachte verkeersintensiteiten op de Harmsenknoop in 2040 berekend. Vervolgens worden de uitgangspunten voor de toekomstige situatie in kaart gebracht.

4.1 Toekomstige verkeersintensiteiten op de Harmsenknoop

De verwachte toekomstige verkeersintensiteiten op de Harmsenknoop worden bepaald met behulp van het Nederland Regionaal Model (NRM). Het huidige NRM is gebaseerd op het jaar 2018 en geeft de verwachte verkeersintensiteiten voor 2040, waarbij demografische en economische ontwikkelingen zijn doorgerekend op basis van het bestaande vastgestelde beleid (NRM - Rijkswaterstaat, z.d.).

Voor dit onderzoek is gekozen voor het NRM-scenario Hoog, aangezien het ontwerp van de Harmsenknoop ook onder de meest maatgevende omstandigheden moet functioneren. Er wordt gekeken naar het jaar 2040, omdat de huidige toekomstmodellen tot en met 2040 zijn doorgerekend.

Hoewel het in theorie mogelijk is om de intensiteiten van 2040 met een jaarlijks groeipercentage door te rekenen naar latere jaren, is in dit onderzoek gekozen om dat niet te doen. Het NRM houdt namelijk rekening met meerdere ontwikkelingen bij het bepalen van de verwachte toekomstige intensiteiten. Hierdoor wordt deze methode als betrouwbaarder beschouwd dan een berekening op basis van groeipercentages. Er is bewust niet gekeken naar verdere jaren in de toekomst, omdat dit ten koste zou gaan van de betrouwbaarheid van de verwachte intensiteiten.

4.1.1 Verkeersintensiteiten op de Harmsenknoop in 2023 en 2040

Om te bepalen of de toekomstige verkeersintensiteiten van het Nederlands Regionaal Model (NRM) binnen de lijn der verwachting liggen, zijn naast de intensiteiten van 2040 ook de huidige verkeersintensiteiten van 2023 op de Harmsenknoop nodig. Deze paragraaf beschrijft hoe de huidige en toekomstige verkeersintensiteiten worden verzameld en gaat daarnaast in op de maatgevende verkeersbelasting.

De huidige verkeersintensiteiten op de Harmsenknoop worden bepaald met behulp van INWEVA (Intensiteiten op Wegvakken). Hierbij wordt gebruikgemaakt van de meest recente gegevens, namelijk de verkeersintensiteiten van 2023. De toekomstige verkeersintensiteiten op de wegvakken wordt daarentegen bepaald met het NRM (Nederlands Regionaal Model).

Zowel in het INWEVA als in het NRM kunnen de verkeersintensiteiten worden uitgesplitst naar intensiteiten gedurende de ochtendspits, avondspits en werkdaggemiddelde (INWEVA) of restdag (NRM). Dit resulteert in verkeersintensiteiten voor de volgende tijdsperiodes (INWEVA – Rijkswaterstaat, z.d.; NRM – Rijkswaterstaat, z.d.):

- **Ochtendspits:** 7:00 – 9:00 uur
- **Avondspits:** 16:00 – 18:00 uur
- **Werkdaggemiddelde (INWEVA):** 7:00 – 18:00 uur
- **Restdag (NRM):** 9:00 – 16:00 uur

De tijdsperiode van het werkdaggemiddelde van het INWEVA komt grotendeels overeen met de zogenoemde restdag van het NRM. Om te voorkomen dat de lagere verkeersintensiteiten in het weekend het gemiddelde beïnvloeden, wordt gewerkt met werkdaggemiddelden, waarbij de intensiteiten van maandag tot en met vrijdag worden meegenomen. Om dezelfde reden worden de verkeersintensiteiten tijdens de avond- en nachturen buiten beschouwing gelaten.

Hoewel het volgens verkeersdeskundige van Rijkswaterstaat gebruikelijk is om enkel naar de intensiteiten in de ochtendspits en avondspits te kijken (de Bruijn & van Rongen, 2025), wordt vanwege het hoge aandeel vrachtverkeer in de regio gecontroleerd of de verkeersbelasting van de restdag of werkdag gemiddelde inderdaad lager is dan die van de ochtend- en avondspits. Dit is belangrijk aangezien het aandeel personenauto's tijdens de ochtend- en avondspits maatgevend is, terwijl vrachtverkeer vooral buiten de spitsuren rijdt en daardoor overdag bepalend kan zijn voor de verkeersbelasting (Rijkswaterstaat, 2024).

Om de maatgevende verkeersbelasting te bepalen, is het noodzakelijk om onderscheid te maken tussen de verschillende voertuigklassen. Het INWEVA en NRM hanteren de volgende voertuigklassen: lichtverkeer (L1), middelzwaar vrachtverkeer (L2) en zwaar vrachtverkeer (L3) (INWEVA – Rijkswaterstaat, z.d.; NRM – Rijkswaterstaat, z.d.). Voor dit onderzoek worden de intensiteiten van de personenauto's (L1) en de intensiteiten van het vrachtverkeer (L2 en L3) apart bekeken.

Deze onderverdeling in voertuigklassen maakt het mogelijk om de verkeersintensiteiten uit te drukken in Personenauto Equivalenten (PAE). In deze benadering staat één personenauto gelijk aan 1 PAE, terwijl vrachtverkeer wordt omgerekend met specifieke PAE-factoren, omdat vrachtwagens meer ruimte innemen op de weg. Voor deze omzetting worden dezelfde PAE-factoren gehanteerd als binnen het NRM (NRM - Rijkswaterstaat, z.d.):

- **Personenauto's (L1):** 1,0
- **Vrachtverkeer (L2 en L3):** 2,0

Voor elk wegvak op de Harmsenknoop zijn de verkeersintensiteiten van 2023 uit het INWEVA verzameld en die van 2040 zijn verzameld uit het NRM. Dit levert intensiteiten voor de ochtendspits, avondspits en werkdag gemiddelde (INWEVA) of restdag (NRM). Deze intensiteiten worden eerst uitgedrukt in voertuigen per uur [vtg/uur], voordat ze worden omgerekend naar Personenauto Equivalenten per uur [PAE/uur]. De verkeersbelasting in PAE/uur wordt berekend met de PAE-factoren 1,0 en 2,0 en met de volgende formule:

$$\text{Verkeersbelasting} \left[\frac{\text{PAE}}{\text{uur}} \right] = (1,0 * L1) + (2,0 * (L2 + L3)) \quad (1)$$

Waarbij:

- **L1** = aantal personenauto's [vtg/uur]
- **L2** = aantal middelzwaar vrachtverkeer [vtg/uur]
- **L3** = aantal zwaar vrachtverkeer [vtg/uur]

Op deze manier ontstaat voor zowel de ochtendspits, avondspits en werkdag gemiddelde (INWEVA) en restdag (NRM) een overzicht van de verkeersbelasting per wegvak op de Harmsenknoop. De bijbehorende labels en de locatie van de wegvakken zijn weergegeven in de figuren van Bijlage 4.

De verzamelde verkeersintensiteiten voor 2023 en 2040 van de wegvakken op de Harmsenknoop in voertuigen per uur en de bijbehorende berekende verkeersbelasting in PAE per uur zijn weergegeven in Bijlage 5.

Wanneer de verkeersbelasting in PAE per uur van de drie tijdsperiodes (ochtendspits, avondspits, werkdag gemiddelde/restdag) worden vergeleken voor zowel 2023 als 2040, blijkt dat de ochtend- en avondspits in beide gevallen maatgevend zijn ten opzichte van de restdag/werkdag gemiddelde. Dit betekent dat dit onderzoek zich uitsluitend zal richten op de intensiteiten in voertuigen per uur van de ochtend- en avondspits, omdat zelfs in deze regio, nabij de Rotterdamse Haven, het aandeel vrachtverkeer niet leidt tot het maatgevend maken van de tijdsperiode restdag/werkdag gemiddelde.

Om te analyseren of de verkeersbelasting voor 2040 uit het NRM binnen de verwachting ligt, worden de intensiteiten voor 2040 in de volgende paragraaf vergeleken met die van 2023.

4.1.2 Vergelijking van de verkeersbelasting van 2023 en 2040

De vergelijking van de huidige (2023) en toekomstige (2040) verkeersintensiteiten van de ochtend- en avondspits is weergegeven in Tabel 1. Hierbij zijn per wegvak het totale aantal voertuigen per uur berekend door de som van personenauto's en vrachtverkeer te nemen.

De vergelijking van de huidige en toekomstige verkeersintensiteiten is met verkeersadviseurs van Rijkswaterstaat besproken. Zij gaven aan dat het NRM een tekortkoming vertoond in de verdeling van het verkeer over de Calandbrug en de Thomassentunnel. Het model wijst voertuigen namelijk de snelste route toe, maar houdt onvoldoende rekening met het feit dat vrachtverkeer met gevaarlijke stoffen verplicht via de Calandbrug moet rijden (de Bruijn & van Rongen, 2025).

De wegvakken die voornamelijk afhankelijk zijn van verkeer over de Calandbrug zijn in Tabel 1 in het oranje weergegeven, omdat deze voorspelde intensiteiten voor 2040 volgens de verkeersadviseurs niet realistisch zijn binnen het NRM. Daarnaast stuurt het model te weinig verkeer richting de N57, waardoor sommige wegvakken een afname in verkeersintensiteit laten zien ten opzichte van 2023. Deze afnemende intensiteiten zijn in het lichtblauw weergegeven in Tabel 1. De locaties van deze wegvakken zijn weergegeven in Bijlage 4.

Tabel 1: Vergelijking van verkeersintensiteiten van 2023 (INWEVA) en van 2040 (NRM) (INWEVA – Rijkswaterstaat, z.d.; NRM – Rijkswaterstaat, z.d.). De oranje intensiteiten zijn beïnvloed door een tekortkoming in het NRM, omdat het NRM te weinig verkeer via de Calandbrug stuurt. De blauwe getallen laten een afname in verkeersintensiteiten zien, doordat het NRM te weinig verkeer naar de N57 stuurt (de Bruijn & van Rongen, 2025).

Ochtendspits				Avondspits			
Wegvak	vtg/uur 2023	vtg/uur 2040	Toename	Wegvak	vtg/uur 2023	vtg/uur 2040	Toename
AO1	2607	4220	1613	AO1	2844	3674	830
AO2	2959	3457	498	AO2	2924	3723	799
AW1	1809	2126	317	AW1	882	1328	446
AW2	1126	1208	82	AW2	1869	2536	667
B1	370	214	-156	B1	395	409	14
B2	88	0	-88	B2	73	0	-73
B3	280	181	-99	B3	255	512	257
B4	17	130	113	B4	27	98	71
B5	227	304	77	B5	87	288	201
C1	269	41	-228	C1	235	414	179
C2	161	50	-111	C2	427	414	-13
D1	2258	3406	1148	D1	2462	3266	804
D2	1576	1822	246	D2	794	1039	245
E1	691	1583	892	E1	1679	2226	547
E2	726	1611	885	E2	1813	2232	419
F1	96	19	-77	F1	216	143	-73
F2	67	1	-66	F2	58	137	79
F3	19	1	-18	F3	78	137	59
F4	46	1	-45	F4	108	137	29
F5	411	1190	779	F5	514	884	370
F6	271	1180	909	F6	214	677	463
F7	544	1209	665	F7	500	1137	637
G1	1031	1189	158	G1	1718	2393	675
G2	2427	2248	-179	G2	2454	2585	131
H1	25	18	-7	H1	150	6	-144

H2	25	18	-7	H2	150	6	-144
J1	543	1189	646	J1	223	722	499
J2	338	1189	851	J2	396	747	351
K1	1598	1234	-364	K1	809	382	-427
K2	1413	1060	-353	K2	735	192	-543
K3	1413	1060	-353	K3	735	192	-543
L1	208	173	-35	L1	62	190	128
N1	887	1652	765	N1	2239	2647	408
N2	2084	2424	340	N2	998	1104	106

Volgens de verkeersadviseurs kan de onjuiste verdeling van verkeersstromen in het NRM worden gecorrigeerd door de huidige verdeling van verkeer op de Harmsenknoop in 2023 door te trekken naar de toekomst. Hiervoor moet allereerst de huidige verdeling van het verkeer over de verschillende verkeerstromen op de Harmsenknoop worden bepaald. Dit gebeurt in de volgende paragraaf.

4.1.3 Verdeling van het verkeer op de Harmsenknoop in 2023

Voordat de huidige verdeling van het verkeer over de tien verschillende routes op de Harmsenknoop kan worden berekend, moet per verkeersstroom worden vastgesteld welk wegvak de intensiteit van deze route vertegenwoordigt. Door de routes op de Harmsenknoop en de bijbehorende wegvakken te analyseren, is het mogelijk om per verkeersstroom het representatieve wegvak te identificeren. Dit betreft een wegvak dat uitsluitend wordt gebruikt door verkeer van één specifieke stroom. Aangezien sommige wegvakken worden gebruikt door meerdere verkeersstromen, kunnen deze een hogere intensiteit hebben dan de intensiteit die representatief is voor een specifieke stroom.

Als voorbeeld wordt gekeken naar de verkeersstroom N57 → A15 West. Uit Figuur 61 van Bijlage 2, in combinatie met de locatie en labels van de wegvakken in Bijlage 4, blijkt dat wegvak L1 uitsluitend door het verkeer van de route N57 → A15 West wordt gebruikt. De verkeersintensiteit van wegvak L1 is daarom representatief voor deze route.

Voor de verkeersstromen A15 West → Calandbrug, Calandbrug → N57 en N57 → Calandbrug wordt een andere methode toegepast. Het INWEVA en NRM bevatten namelijk geen gegevens over verkeer van de Moezelweg en Neckarweg, aangezien deze wegen geen onderdeel zijn van het hoofdwegenet. In deze gevallen wordt het representatieve wegvak bepaald door het wegvak met de hoogste intensiteit te nemen van de relevante wegvakken nabij de rotonde bij de Moezelweg en de op- en afrit naar de Neckarweg.

Als voorbeeld wordt de stroom Calandbrug → N57 bekeken. Figuur 58 van Bijlage 2, in combinatie met Bijlage 4, laat zien dat de wegvakken C1 en C2 uitsluitend door verkeer op deze route worden gebruikt. Aangezien beide wegvakken aansluiten op de rotonde bij de Moezelweg, wordt de maximale intensiteit van C1 en C2 als representatief beschouwd voor deze verkeersstroom. Op deze manier wordt de invloed van de Moezelweg toch in de analyse meegenomen.

Tabel 2 geeft de representatieve wegvakken per verkeersstroom op de Harmsenknoop weer.

Nu voor elke verkeersstroom het representatieve wegvak is vastgesteld, kan worden gestart met het berekenen van de verkeersverdeling op de Harmsenknoop in 2023. Hierbij wordt gekeken naar de verdeling van verkeer van de vier hoofdstromen (A15 West, Calandbrug, N57 en Thomassentunnel).

Zo kan verkeer afkomstig van de Calandbrug zowel richting de A15 West als richting de N57 rijden. Het aandeel verkeer dat van de Calandbrug naar de N57 rijdt, wordt berekend door de verkeersintensiteit van het representatieve wegvak van de route Calandbrug → N57 te delen door het totale verkeer dat vanaf de Calandbrug de Harmsenknoop betreedt. Op vergelijkbare wijze wordt het percentage bepaald

voor verkeer van de Calandbrug naar de A15 West. Deze twee percentages moeten samen optellen tot 100%, zodat het totale verkeer vanaf de Calandbrug volledig over deze twee routes wordt verdeeld.

Voor de overige hoofdstromen wordt de verdeling op identieke wijze berekend. De gebruikte formules zijn opgenomen in de laatste kolom van Tabel 2. Verkeer dat de Harmsenknoop nadert via de A15 West wordt geregistreerd op wegvak AW2, terwijl verkeer vanaf de N57 via wegvak N2 binnenkomt. Verkeer dat via de Calandbrug komt, wordt aangeduid met het label CalandbrugOW (Oost → West), en verkeer via de Thomassentunnel met TunnelOW.

Tabel 2: Overzicht representatieve wegvakken per verkeersstroom op de Harmsenknoop en de berekening van het percentage van de verdeling van het verkeer op de Harmsenknoop

Verkeersstroom	Representatieve wegvak	Berekening percentage
A15 West → Calandbrug	max(F2,F3,F4)	max(F2,F3,F4) / AW2
A15 West → Thomassentunnel	G1	G1 / AW2
A15 West → N57	H1	H1 / AW2
Calandbrug → A15 West	B4	B4 / CalandbrugOW
Calandbrug → N57	max(C1, C2)	max(C1, C2) / CalandbrugOW
N57 → Calandbrug	max(J1, J2)	max(J1, J2) / N2
N57 → Thomassentunnel	K2	K2 / N2
N57 → A15 West	L1	L1 / N2
Thomassentunnel → A15 West	D2	D2 / TunnelOW
Thomassentunnel → N57	E1	E1 / TunnelOW

Op basis van de formules in Tabel 2 wordt voor elke verkeersstroom en voor zowel de ochtend- als avondspits het aandeel personenauto's en vrachtverkeer afzonderlijk berekend. De resultaten van deze verdeling zijn weergegeven in Tabel 30 en Tabel 31 van Bijlage 6. Deze percentages worden gebruikt om de verkeersbelasting in 2040 te bepalen.

4.1.4 Berekening maatgevende verkeersbelasting in 2040 met huidige verdeling

Om de maatgevende verkeersbelasting op de Harmsenknoop in 2040 te bepalen op basis van de verdeelpercentages uit 2023 en de vier hoofdstromen, moeten eerst de verkeersintensiteiten van deze hoofdstromen in 2040 worden vastgesteld. Voor verkeer afkomstig van de N57 kan hiervoor de intensiteit van wegvak N2 uit het Nederlands Regionaal Model (NRM) worden gebruikt. Verkeer vanuit de A15 West wordt vertegenwoordigd door de intensiteit van wegvak AW2. De locatie van deze wegvakken is weergegeven in Bijlage 4.

Om de verdeling van het verkeer vanaf de A15 Oost over de Calandbrug en de Thomassentunnel in 2040 realistisch te maken, wordt opnieuw gekeken naar de verkeersverdeling in 2023. Daarbij worden uitsluitend de intensiteiten van de vier hoofdstromen beschouwd: A15 West, Calandbrug, N57 en Thomassentunnel. Voor de bepaling van de verkeersverdeling vanaf de A15 Oost is het voldoende om uitsluitend het verkeer in de rijrichting van oost naar west te analyseren.

Bij deze analyse van verkeer in de richting van oost naar west worden nieuwe percentages berekend om het aandeel verkeer te bepalen dat van de A15 Oost naar respectievelijk de Calandbrug of Thomassentunnel rijdt. Hiervoor worden de volgende formules gehanteerd:

Percentage (p) verkeer van A15 Oost naar Calandbrug:

$$p_{A15\ Oost \rightarrow Calandbrug} = \frac{B3 - V_{van\ Droespolderweg}}{D1 + (B3 - V_{van\ Droespolderweg})} \quad (2)$$

Percentage (p) verkeer van A15 Oost naar Thomassentunnel:

$$p_{A15\ Oost \rightarrow Tunnel} = \frac{D1}{D1 + (B3 - V_{van\ Droespolderweg})} \quad (3)$$

Waarbij:

- **B3** = verkeersintensiteit op wegvak B3 (Calandbrug, richting Oost → West)
- **D1** = verkeersintensiteit op wegvak D1 (Thomassentunnel, richting Oost → West)
- **V_{van Droespolderweg}** = intensiteit van verkeer dat vanaf de Droespolderweg de Calandbrug oprijdt

Het is van belang te benadrukken dat het verkeer op de Calandbrug afkomstig is van twee bronnen: verkeer vanaf de A15 Oost en verkeer dat via de Droespolderweg de brug oprijdt. Bij het bepalen van het aandeel van het verkeer dat vanaf de A15 Oost afkomstig is, moet het verkeer vanaf de Droespolderweg worden afgetrokken van de totale intensiteit op de Calandbrug. Dit voorkomt dat een te groot percentage van het verkeer ten onrechte aan de A15 Oost wordt toegeschreven.

Nu de percentages voor de verdeling van het verkeer over de Calandbrug en de Thomassentunnel zijn vastgesteld, kunnen op basis hiervan de intensiteiten van de hoofdstromen CalandbrugOW en TunnelOW voor 2040 worden berekend. De volgende formules worden hiervoor gebruikt:

Intensiteit van hoofdstroom CalandbrugOW:

$$CalandbrugOW = \left(p_{A15\ Oost \rightarrow Calandbrug} * (AO1 - V_{naar\ Droespolderweg}) \right) + V_{van\ Droespolderweg} \quad (4)$$

Intensiteit van hoofdstroom TunnelOW:

$$TunnelOW = p_{A15\ Oost \rightarrow Tunnel} * (AO1 - V_{naar\ Droespolderweg}) \quad (5)$$

Waarbij:

- **AO1** = verkeersintensiteit op wegvak AO1 (A15 Oost voor de afslag naar de Calandbrug en de Droespolderweg)
- **V_{naar Droespolderweg}** = intensiteit van verkeer dat vanaf de A15 Oost naar de Droespolderweg afslaat

De verdeling van het verkeer over de Calandbrug en de Thomassentunnel wordt afzonderlijk berekend voor personenauto's en vrachtverkeer voor zowel de ochtend- als avondspits. De hiervoor benodigde gegevens zijn gebaseerd op de telcijfers van het INWEVA uit 2023.

De resulterende intensiteiten van deze hoofdstromen, samen met de bekende intensiteiten uit het NRM van de N57, de A15 West en het verkeer van en naar de Droespolderweg, vormen de basis voor het berekenen van de intensiteiten per verkeersstroom op de Harmsenknoop in 2040. Dit gebeurt door de verdelingspercentages uit 2023 (paragraaf 4.1.3) te vermenigvuldigen met de bijbehorende intensiteit van de desbetreffende hoofdstroom in 2040.

In Bijlage 7 is de berekening van de verdelingspercentages van het verkeer van de A15 Oost over de Calandbrug en de Thomassentunnel opgenomen. Daarnaast zijn in Tabel 35 in Bijlage 7 de verkeersintensiteiten in 2040 op basis van de verdelingspercentages uit 2023 weergegeven.

4.1.5 Overzicht toekomstige verkeersintensiteiten 2040

De complexe berekening van de verkeersintensiteiten in 2040 resulteert in de intensiteiten van Tabel 3. Hierbij zijn de totale intensiteiten in voertuigen per uur berekend door de som te nemen van het aantal personenauto's en vrachtverkeer. Ter vergelijking is ook de maatgevende verkeersbelasting van 2023 weergegeven, zodat de ontwikkeling tussen beide jaren inzichtelijk kan worden gemaakt.

Tabel 3: Overzicht en vergelijking van verkeersintensiteiten op de Harmsenknoop in 2023 en in 2040. De intensiteiten van 2040 zijn gebaseerd op de verdeling van het verkeer in 2023.

Verkeersstroom	Ochtendspits			Avondspits		
	vgt/uur 2023	vgt/uur 2040	Toename	Vtg/uur 2023	Vtg/uur 2040	Toename
A15 West → Calandbrug	67	71	4	117	150	33
A15 West → Thomassentunnel	1031	1110	79	1718	2200	482
A15 West → N57	25	27	2	150	186	36
Calandbrug → A15 West	18	103	18	27	146	24
Calandbrug → N57	293	201	-92	428	504	76
N57 → Calandbrug	544	605	61	409	385	-24
N57 → Thomassentunnel	1413	1610	197	735	651	-84
N57 → A15 West	208	209	1	62	69	7
Thomassentunnel → A15 West	1576	2264	688	794	1028	234
Thomassentunnel → N57	691	1085	394	1679	2196	517

Uit Tabel 3 blijkt dat de intensiteit van bijna alle verkeersstromen toeneemt in 2040. In de ochtendspits laat de verbinding Calandbrug → N57 een afname zien en in de avondspits geldt dit voor de verbindingen N57 → Calandbrug en N57 → Thomassentunnel. Vergeleken met de afname in verkeersintensiteiten van deze verbindingen wanneer de intensiteiten van 2040 volledig op het Nederlands Regionaal Model zijn gebaseerd (Tabel 1), is de afname voor deze drie verbindingen gehalveerd. Dit betekent dat de methode waarbij de huidige verkeersverdeling wordt doorgetrokken naar de toekomst, de tekortkomingen van het NRM vermindert.

Daarnaast heeft de verbinding N57 → A15 West slechts een kleine toename. Deze ontwikkeling is in lijn met de verwachtingen, gezien de toekomstige ontwikkelingen in de omgeving en de opening van de Blankenburgverbinding, zoals toegelicht in paragraaf 3.3.

Een mogelijke verklaring voor de (lichte) toename van het verkeer op de route N57 → A15 West is dat een deel van dit verkeer in 2040 via de N496 of de N218 richting de A15 West en de Maasvlakte rijdt. Deze aanname is besproken met verkeersdeskundigen van Rijkswaterstaat en wordt ondersteund door het NRM, waarin te zien is dat de verkeersintensiteit op beide N-wegen in 2040 is toegenomen (de Bruijn & van Rongen, 2025).

De verkeersdeskundigen zijn van mening dat de berekende verkeersintensiteiten voor 2040 in de lijn der verwachting liggen en daarom kunnen worden gebruikt voor het nieuwe ontwerp (de Bruijn & van Rongen, 2025).

4.2 Uitgangspunten voor toekomstige situatie

In deze paragraaf worden de uitgangspunten voor de toekomstige situatie beschreven, zodat deze als randvoorwaarden bij het nieuwe ontwerp van de Harmsenknoop in acht worden genomen.

4.2.1 Toekomstige hoogte van de Harmsenbrug

Direct naast de Harmsenknoop ligt de Harmsenbrug. Het verkeer van de N57 passeert het Hartelkanaal via de Harmsenbrug om de Harmsenknoop te bereiken. Rijkswaterstaat heeft vastgesteld dat de Harmsenbrug binnen 10 tot 15 jaar einde technische levensduur zal zijn. Om te bepalen wat over 10 tot 15 jaar met de Harmsenbrug moet gebeuren, is Rijkswaterstaat een vernieuwingsopgave gestart. Bij deze vernieuwingsopgave wordt gekeken naar mogelijke scenario's voor het vernieuwen of renoveren van de Harmsenbrug.

De mogelijke varianten voor de Harmsenbrug zijn hieronder weergegeven (Rijkswaterstaat, 2024):

- **Variant 0:** Enkel essentieel onderhoud uitvoeren
- **Variant 1:** Harmsenbrug vastleggen, zodat de brug geen beweegbaar deel bevat:
 - **Variant 1a:** Huidige beweegbare klep vergrendelen op +11,45 m
 - **Variant 1b:** Beweegbaar deel vervangen door vaste overspanning
 - **Variant 1c:** Volledige vaste brug verhogen naar +12,07 m
 - **Variant 1d:** Volledige vaste brug vervangen op +11,45 m
- **Variant 2:** Herstellen van de beweegbare functionaliteit van de huidige Harmsenbrug

Rijkswaterstaat heeft momenteel nog geen definitieve keuze gemaakt voor één van de varianten. De uiteindelijke beslissing is afhankelijk van de uitkomsten van een constructieve herberekening van de brug, die de huidige technische staat zal vaststellen. De resultaten van deze herberekening worden aan het einde van 2026 verwacht.

Vanwege de krappe tijdsplanning binnen dit onderzoek wordt een aanneme gedaan voor de toekomstige hoogte van de Harmsenbrug. Aangezien de constructieve vorm van de brug geen directe invloed heeft op het ontwerp van de Harmsenknoop (zolang de locatie gelijk blijft), hoeft in dit stadium uitsluitend een aanneme voor de doorvaarhoogte te worden gedaan. Hierbij gelden de volgende mogelijke hoogtes:

- Indien de brug op de huidige hoogte blijft: **+11,45 meter boven NAP**
- Indien de brug verhoogd wordt: **+12,07 meter boven NAP**

Uit de omgevingsanalyse van Rijkswaterstaat blijkt dat het verhogen van de Harmsenbrug zowel voor- als nadelen kent.

Een belangrijk voordeel is dat de brug bij een doorvaarhoogte van +12,07 meter boven NAP geen beweegbaar deel meer nodig heeft. Dit maakt bijbehorende installaties, onderhoud en kosten overbodig. Een dergelijke hoogte is voldoende voor klasse 4HQ-containerschepen met vier-laags gestapelde containers (Rijkswaterstaat, 2024). Daarnaast zou de Harmsenbrug dan dezelfde doorvaarhoogte krijgen als de naastgelegen Suurhoffbrug, wat de uniformiteit in het Hartelkanaal ten goede komt.

Tegenover deze voordelen staan echter ook nadelen. De verhoging brengt aanzienlijke kosten met zich mee en vereist aanpassingen aan de omliggende infrastructuur om aan te sluiten op het hogere brugdek.

Om te bepalen welke doorvaarhoogte het meest waarschijnlijk is, is advies ingewonnen bij de assetmanager van Rijkswaterstaat, die betrokken is bij de vernieuwingsopgave van de Harmsenbrug. De expert bevestigt dat verhoging wenselijk is voor de doorvaart van hoge schepen van het Havenbedrijf Rotterdam richting de Noordzee via het Hartelkanaal. Tegelijkertijd geeft hij aan dat deze schepen ook gebruik kunnen maken van een alternatieve vaarroute via de Rozenburgsesluis en het Calandkanaal naar de Nieuwe Waterweg (Roosenschoon, 2025).

Daarnaast wijst de expert op een derde oplossingsrichting: een brug met een zeeg. Hierbij blijven de landhoofden op de huidige hoogte, maar krijgt het brugdek een kromming waardoor de doorvaarhoogte in het midden toeneemt. Bovendien blijkt uit de praktijk dat 4HQ-containerschepen de huidige Harmsenbrug (doorvaarhoogte van +11,45 m) kunnen passeren binnen een ruim tijdsvenster, wanneer zij gebruikmaken van de getijdenwerking (Roosenschoon, 2025).

Op basis van deze overwegingen wordt voor het verdere ontwerp uitgegaan van een toekomstige doorvaarhoogte van +11,45 meter boven NAP voor de Harmsenbrug. De hoge scheepvaart beschikt over alternatieve routes en tij-afhankelijke passeermogelijkheden. Een bijkomend voordeel van het

aanhouden van de huidige hoogte is dat de constructieve opbouw van de brug niet verandert. Hierdoor hoeft geen nieuwe aanname te worden gedaan voor de hoogte van het brugdek.

Voor het ontwerp van de Harmsenknoop is immers niet de doorvaarhoogte (onderkant brug), maar de bovenkant van het brugdek relevant. Deze wordt afgeleid uit de technische tekeningen van de huidige Harmsenbrug. De technische tekening van de doorsnede van het landhoofd van de bestaande Harmsenbrug is weergegeven in Bijlage 8 en laat zien dat het brugdek op een hoogte van +13,20 meter boven NAP ligt.

4.2.2 Hoogte van het wegdek van de Calandbrug en Thomassentunnel

Naast de hoogte van het brugdek van de Harmsenbrug zijn ook de hoogte van het brugdek van de Calandbrug en de hoogte van de tunnelmond van de Thomassentunnel belangrijke uitgangspunten voor het toekomstige ontwerp van de Harmsenknoop. Deze hoogtes worden afgeleid uit de technische tekeningen van de Calandbrug en de Thomassentunnel.

De technische tekening van de langsdoorsnede van de Calandbrug is weergegeven in Bijlage 8. Deze tekening laat zien dat het brugdek van de Calandbrug bij beide landhoofden op een hoogte ligt van +7,72 meter boven NAP (Rijkswaterstaat - Bouwdienst, 1997).

De technische tekening van de westelijke tunnelmond van de Thomassentunnel is weergegeven in Bijlage 8. Volgens de technische tekening heeft het wegdek in de zuidelijke tunnelbuis een verkanting van 3,3%, terwijl het wegdek in de noordelijke tunnelbuis een verkanting heeft van 3,6%. De noordelijke tunnel heeft een breedte van 16,299 meter en de hoogte varieert van +2,306 meter tot +2,903 meter (Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, 2004). De hoogte van het midden de noordelijke tunnelbuis kan worden berekend met $2,903 + \frac{2,903-2,306}{2} = +2,605 \text{ m}$. De zuidelijke tunnelbuis heeft een breedte van 16,544 meter en de hoogte varieert van +2,765 tot +3,321 meter (Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, 2004). De hoogte van het midden van de zuidelijke tunnelbuis komt daar mee op $2,765 + \frac{3,321-2,765}{2} = +3,043 \text{ m}$.

4.2.3 Toekomstige ontwikkelingen in de omgeving

Om de toekomstige ontwikkelingen in de omgeving van de Harmsenknoop in kaart te brengen, is gekeken naar de regioanalyse van de Harmsenbrug in 2024 (Rijkswaterstaat, 2024) en naar de omgevingsanalyse van het onderzoek naar de bereikbaarheid van Voorne-Putten en de Rotterdamse Haven in 2021 (Rijkswaterstaat & Royal HaskoningDHV, 2021).

De ontwikkeling omtrent de toekomstige hoogte van de Harmsenbrug is beschreven in paragraaf 4.2.1 en hier is aangenomen dat de Harmsenbrug in de toekomst op dezelfde locatie en hoogte blijft liggen. Dit betekent dat bij het nieuwe ontwerp van de Harmsenknoop de afmetingen en hoogte van de brug bekend zijn en ze kunnen worden afgelezen van technische tekeningen van de huidige Harmsenbrug.

Uit het onderzoek naar de bereikbaarheid van Voorne-Putten kwam naar voren dat een verkeerstoename in de regio van de N57 en de Harmsenknoop wordt verwacht (Rijkswaterstaat & Royal HaskoningDHV, 2021). De berekening van de verwachte verkeersintensiteiten op de Harmsenknoop in 2040 zijn in paragraaf 4.1 bepaald aan de hand van het Nederlands Regionaal Model (NRM). Het NRM houdt rekening met ruimtelijke ontwikkelingen in de omgeving, waardoor de berekende intensiteiten van paragraaf 4.1.5 gebruikt kunnen worden als basis voor het ontwikkelen van het nieuwe ontwerp van de Harmsenknoop.

De opslagterminals ten noorden van de Harmsenknoop maken deel uit van het Rotterdamse havengebied. Uit overleg met een expert van Rijkswaterstaat, die betrokken is bij de samenwerking met het Havenbedrijf Rotterdam, blijkt dat Rijkswaterstaat geen informatie beschikbaar heeft over de toekomstplannen van de eigenaar van het terrein waarop de opslagterminals zich bevinden (Heller,

2025). Hierdoor is onduidelijk of de omvang van het terrein in de toekomst zal toenemen, afnemen of gelijk blijft aan de huidige situatie. Voor dit onderzoek wordt daarom aangenomen dat de omvang van de opslagterminals onveranderd blijft en dat het nieuwe ontwerp van de Harmsenknoop niet over dit terrein van de Rotterdamse Haven mag worden gerealiseerd.

Vanwege de nabijheid van de haven bevinden zich in de omgeving van de Harmsenknoop ondergrondse leidingen. De exacte ligging van deze leidingen wordt in dit verkennende onderzoek buiten beschouwing gelaten, aangezien dit buiten de scope van de eerste opzet voor het herontwerp valt. In latere ontwerpfasen van het Kader Wegontwerpproces van Rijkswaterstaat zijn deze leidingen wel relevant. Omdat het huidige ontwerp van de Harmsenknoop tussen de Moezelweg en het Hartelkanaal is gerealiseerd, wordt aangenomen dat het nieuwe ontwerp binnen dit gebied geen aanvullende knelpunten met de leidingen in de ondergrond zal opleveren (Heller, 2025).

Daarnaast is met een omgevingspecialist van Rijkswaterstaat gesproken over andere ontwikkelingen in de omgeving van de Harmsenknoop. De expert gaf aan dat het tracé van de Havenspoorlijn, het eerste deel van de Betuweroute, vrij recent (2021) is verlegd. Hierdoor passeert de spoorlijn het Calandkanaal niet meer via de Calandbrug, waardoor het capaciteitsknelpunt bij de Calandbrug is verholpen (Mobilis, 2021). Het nieuwe tracé passeert de autowegen richting de Calandbrug met twee verhoogde spoorviaducten en vervolgens kruist het spoor de A15 over de tunnelmond van de Thomassentunnel, waarna hij richting de Theemsweg verder gaat. Gezien deze recente tracéwijziging van de Havenspoorlijn, verwacht de expert van Rijkswaterstaat dat deze de komende jaren niet opnieuw zal worden gewijzigd (Eisma, 2025). Dit betekent dat het nieuwe ontwerp van de Harmsenknoop de huidige ligging van de Havenspoorlijn als uitgangspunt kan gebruiken.

5. Randvoorwaarden en programma van eisen

Dit hoofdstuk beschrijft de randvoorwaarden die in acht moeten worden genomen bij het ontwikkelen van het nieuwe ontwerp van de Harmsenknoop, evenals het programma van eisen, waaraan het ontwerp moet voldoen.

5.1 Randvoorwaarden

Hoewel het Kader Wegontwerpproces van Rijkswaterstaat na de uitgangspuntennotitie start met het uitwerken van de ideale ontwerpvariant, is het voor dit onderzoek essentieel dat ook het ideale ontwerp voldoet aan de harde beperkingen uit de omgeving. Dit voorkomt dat ingrijpende aanpassingen aan bestaande infrastructurele constructies, zoals de Harmsenbrug en de Thomassentunnel, nodig zijn bij de realisatie van het ontwerp. Daarom wordt onderscheid gemaakt tussen twee typen randvoorwaarden: de harde randvoorwaarden, waaraan elke ontwerpvariant moet voldoen, en de bespreekbare randvoorwaarden. Van deze laatste mag worden afgeweken bij het opstellen van de ideale ontwerpvariant, mits dit met duidelijke argumentatie wordt onderbouwd en leidt tot een beter ontwerp vanuit verkeerskundig of ontwerptechnisch oogpunt.

Door dit onderscheid ontstaat enerzijds voldoende ontwerp vrijheid om een ideale variant te ontwikkelen die binnen de harde beperkingen blijft, maar waarbij niet strikt wordt vastgehouden aan alle bespreekbare randvoorwaarden. Anderzijds maakt dit onderscheid het mogelijk om in een latere fase, bij het opstellen van de realistische ontwerpvariant, wél alle randvoorwaarden, hard en bespreekbaar, in acht te nemen. De gevolgen van de ontwerpconcessies die hiervoor aan de ideale ontwerpvariant nodig zijn, worden in dit onderzoek geanalyseerd met behulp van microsимуlaties, gericht op doorstroming en verkeersveiligheid.

In overleg met een wegontwerp expert en een omgevingsanalist van Rijkswaterstaat is vastgesteld welke randvoorwaarden als harde en welke als bespreekbare randvoorwaarden worden beschouwd (van Alphen & Eisma, 2025).

5.1.1 Harde randvoorwaarden

De volgende punten gelden als harde randvoorwaarden:

1. Behoud van de ligging en breedte van het Hartelkanaal

Het ontwerp mag geen invloed uitoefenen op waterstanden en vaarverkeer op het Hartelkanaal.

2. Behoud van de ligging en breedte van het Calandkanaal

Het ontwerp mag geen gevolgen hebben voor waterstanden en vaarverkeer op het Calandkanaal.

3. Behoud van de locatie en hoogte van de Harmsenbrug

Het verkeer op de N57 dient het Hartelkanaal te passeren via de bestaande Harmsenbrug. Verplaatsing van deze brug is niet toegestaan.

4. Behoud van de huidige locatie en hoogte van de Calandbrug en de Thomassentunnel

Verkeer van en naar de A15 Oost moet het Calandkanaal oversteken op de bestaande locaties van de Calandbrug en de Thomassentunnel.

5. Geen extra overspanningen boven het Hartelkanaal

Nieuwe verbindingswegen moeten aansluiten op de bestaande landhoofden van de Harmsenbrug. Er mogen geen nieuwe wegvakken boven het Hartelkanaal worden aangelegd.

6. Behoud van de opslagterminals ten noorden van de Harmsenknoop

De locatie en omvang van de bestaande opslagterminals van de Rotterdamse Haven blijven ongewijzigd. In dit gebied is geen extra ruimte beschikbaar voor de knooppuntinrichting.

7. Behoud van de huidige ligging van de Havenspoorlijn (uitgezonderd hoogteligging)

Het horizontale alignement van de Havenspoorlijn ter hoogte van de Harmsenknoop blijft ongewijzigd, waardoor de bestaande route over de tunnelmond van de Thomassentunnel richting de Theemsweg behouden blijft.

5.1.2 Bespreekbare randvoorwaarden

De volgende punten gelden als bespreekbare randvoorwaarden bij het nieuwe ontwerp van de Harmsenknoop:

1. Behoud van de hoogteligging van de Havenspoorlijn

Het verticale alignement van de Havenspoorlijn nabij de Harmsenknoop blijft ongewijzigd.

- Bij de ideale ontwerpvariant mag de Havenspoorlijn, alleen naast de Moezelweg, verlaagd worden, zodat verbindingswegen van het knooppunt bovenlangs kunnen worden gerealiseerd.

2. Behoud van de bestaande ligging van de Moezelweg

De Moezelweg volgt een horizontaal en verticaal alignement parallel aan de opslagterminals van de Rotterdamse haven.

- Bij de ideale ontwerpvariant mag de Moezelweg verdiept worden aangelegd om ruimte te creëren voor verbindingswegen van het knooppunt.

3. Behoud van de aansluiting van de Moezelweg en de Harmsenknoop

De aansluiting van de Moezelweg op het knooppunt blijft behouden, waardoor uitwisseling van het verkeer van de Calandbrug, N57 en de Moezelweg mogelijk is op de Harmsenknoop.

- In de ideale ontwerpvariant mag deze aansluiting worden verplaatst of weggelaten, indien dit leidt tot een optimaler ontwerp en de omreisfactoren in kaart worden gebracht.

5.2 Programma van eisen

Om tot een nieuw knooppuntontwerp voor de Harmsenknoop te komen, worden eisen opgesteld waaraan alle ontwerpvarianten moeten voldoen. Dit zorgt ervoor dat een ontwerp wordt ontwikkeld dat voldoet aan de gewenste functies en kwaliteit. De eisen worden onderverdeeld in functionele eisen en eisen ten aanzien van de wegcategorie.

5.2.1 Functionele eisen

Functionele eisen beschrijven kwalitatief of kwantitatief de gewenste prestaties en functies van het nieuwe knooppuntontwerp. De volgende functionele eisen gelden voor de Harmsenknoop:

1. De Harmsenknoop moet een wegverbinding tussen de volgende wegen accommoderen:

- | | | |
|---------------------|---|-----------------|
| 1. A15 West | → | Calandbrug |
| 2. A15 West | → | Thomassentunnel |
| 3. A15 West | → | N57 |
| 4. Calandbrug | → | A15 West |
| 5. Calandbrug | → | N57 |
| 6. N57 | → | Calandbrug |
| 7. N57 | → | Thomassentunnel |
| 8. N57 | → | A15 West |
| 9. Thomassentunnel | → | A15 West |
| 10. Thomassentunnel | → | N57 |

2. De Harmsenknoop moet de intensiteiten uit Tabel 4 kunnen verwerken.

De intensiteiten uit Tabel 4 zijn de verwachte verkeersintensiteiten in 2040 volgens het Nederlands Regionaal Model (NRM), waarbij de huidige verdeling van het verkeer in 2023 is doorgetrokken om de tekortkomingen van het model te verminderen.

De intensiteiten zijn voor zowel de ochtend- als avondspits onderverdeeld in het aantal personenauto's en het aantal vrachtwagens.

Tabel 4: Overzicht intensiteiten per verkeersstroom in de ochtend- en avondspits in 2040 (NRM - Rijkswaterstaat, z.d.)

Verkeersstroom	Ochtendspits		Avondspits	
	Personenauto's [vtg/uur]	Vrachtverkeer [vtg/uur]	Personenauto's [vtg/uur]	Vrachtverkeer [vtg/uur]
A15 West → Calandbrug	38	33	98	52
A15 West → Thomassentunnel	688	422	1557	643
A15 West → N57	22	5	175	11
Calandbrug → A15 West	67	36	95	51
Calandbrug → N57	57	144	378	126
N57 → Calandbrug	564	41	297	88
N57 → Thomassentunnel	1571	39	584	67
N57 → A15 West	147	62	34	35
Thomassentunnel → A15 West	1948	316	595	433
Thomassentunnel → N57	1028	57	2137	59

3. Het knooppuntontwerp moet verkeersveilig zijn (op zijn minst veiliger dan het huidige ontwerp)

Om het knooppunt verkeersveilig te maken, moet het ontwerp voldoen aan de Richtlijnen Ontwerp Autosnelweg (ROA) en het Handboek Wegontwerp buiten de bebouwde kom van het CROW. Binnen deze richtlijnen zijn eisen voor boogstralen, hellingen, ontwerpshnelheden en zichtlijnen opgenomen.

4. Het knooppunt moet goede doorstroming van het verkeer garanderen (op zijn minst beter dan het huidige ontwerp)

Om goede doorstroming over het knooppunt te garanderen, moet het ontwerp ontwikkeld worden aan de hand van het Handboek Capaciteitswaarden Infrastructuur Autosnelwegen (CIA). Door op basis van de maatgevende intensiteit en het bijbehorende vrachtpercentage, de juiste capaciteitswaarden uit dit handboek te hanteren, kan met een I/C-verhouding $\leq 0,8$ een robuust knooppunt en efficiënte doorstroming worden gegarandeerd. Volgens Tabel 2.1 van de CIA zorgt een I/C-verhouding kleiner of gelijk aan 0,8 voor een goede verkeersafwikkeling zonder file, met uitzondering van incidenten (CIA - Rijkswaterstaat, 2024).

5.2.2 Eisen ten aanzien van de wegcategorie

In hoofdstuk 6 van het Handboek Wegontwerp buiten de bebouwde kom worden wegen op basis van hun onderscheidende functie (stromen of uitwisselen) ingedeeld in één van de drie wegcategorieën: erftoegangsweg, gebiedsontsluitingsweg en stroomweg (CROW - Wegontwerp BBK, 2025). Voor het ontwerp van de Harmsenknoop zijn de eisen ten aanzien van stroomwegen van belang. Stroomwegen worden onderverdeeld in autowegen (regionale stroomweg) en autosnelwegen. De A15 is een autosnelweg, terwijl de N57 en N15 (de weg over de Calandbrug) regionale stroomwegen zijn.

De volgende eisen ten aanzien van de homogeniteit van stroomwegen gelden voor de Harmsenknoop (CROW - Wegontwerp BBK, 2025):

5. Conflicten met tegemoetkomend verkeer worden vermeden

Om conflicten met tegemoetkomend verkeer te mijden, is fysieke scheiding van rijrichtingen verplicht.

6. Conflicten met kruisend en overstekend verkeer worden vermeden

Om conflicten met kruisend en overstekend verkeer te mijden, is de stroomweg gesloten voor langzaam verkeer en worden ongelijkvloerse verbindingen toegepast.

7. In- en uitvoegstroken vinden plaats aan de rechterzijde van de rijbaan

8. Langzaam en snel rijdend verkeer mogen niet met elkaar in aanraking komen

6. Functioneel Ontwerp

In het Functioneel Ontwerp (FO) worden op basis van de vastgestelde harde randvoorwaarden en eisen de eerste ontwerpkeuzes voor de ideale ontwerpvariant vastgelegd. Bij de ideale ontwerpvariant mag worden afgeweken van de bespreekbare randvoorwaarden (paragraaf 5.1.2).

In dit hoofdstuk worden eerst het benodigde aantal rijstroken en het rijstrokschema bepaald, waarna het type van de verbindingswegen en mogelijke knooppuntvormen worden bekeken. Verder worden een viltstiftenschets en het type van de discontinuïteiten uitgewerkt. Tot slot wordt een overzicht van de ontwerpkeuzes weergegeven.

6.1 Rijstrokschema

Bij het opstellen van het rijstrokschema van het nieuwe ontwerp zijn zowel het benodigde aantal rijstroken per verkeersstroom als de ligging van de discontinuïteiten nodig. Deze aspecten worden in de volgende paragrafen geanalyseerd.

6.1.1 Benodigd aantal rijstroken per verkeersstroom

Om het benodigde aantal rijstroken te berekenen, wordt de toekomstige intensiteit vergeleken met de capaciteitswaarden uit het Handboek Capaciteiten Infrastructuur Autosnelwegen (CIA). Deze waarden zijn uitgedrukt in voertuigen per uur en gekoppeld aan bijbehorende vrachtpercentages. In het programma van eisen (Hoofdstuk 5) is in Tabel 4 een overzicht gegeven van de verwachte intensiteiten van personenauto's en vrachtverkeer in 2040. De bijbehorende vrachtpercentages kunnen worden berekend met de formule:

$$\text{Vrachtpercentage} = \frac{\text{Aantal vrachtwagens (L2 + L3)}}{\text{Totaal aantal motorvoertuigen (L1 + L2 + L3)}} * 100\% \quad (6)$$

Waarbij:

- **L1** = het aantal personenauto's [vtg/uur]
- **L2 en L3** = het aantal middelzware en zware vrachtwagens [vtg/uur]
- **Totaal aantal motorvoertuigen** = de som van L1, L2 en L3

Het berekende vrachtpercentage wordt afgerond op een veelvoud van 5%, conform de classificaties van het Handboek Capaciteiten Infrastructuur Autosnelwegen (CIA - Rijkswaterstaat, 2024). Het afronden is noodzakelijk, omdat de capaciteitswaarden in het CIA slechts voor discrete vrachtpercentages (in stappen van 5%) beschikbaar zijn. De afronding gebeurt naar het dichtstbijzijnde veelvoud van 5%. Hierbij worden de percentages onder de 5% afgerond naar 5%, zodat het effect van vrachtverkeer aanwezig blijft.

Het aantal rijstroken per verkeersstroom wordt berekend door de verwachte intensiteit te vergelijken met de benodigde capaciteit. Capaciteit is de maximale intensiteit die een wegvak kan afwikkelen en wordt weergegeven in voertuigen per uur [vtg/uur] (CIA - Rijkswaterstaat, 2024). In Bijlage 9 worden de capaciteitswaarden uit de CIA omgerekend aan de hand van reductiefactoren van de bijbehorende vrachtpercentages. Dit maakt het mogelijk om per verkeersstroom de benodigde capaciteit te bepalen met de norm $\frac{I}{C} \leq 0,8$ (CIA - Rijkswaterstaat, 2024).

Volgens Tabel 2.1 van de CIA zorgt een I/C-verhouding kleiner of gelijk aan 0,8 voor een goede verkeersafwikkeling zonder file, met uitzondering van incidenten. Een I/C-verhouding groter dan 0,8 zal leiden tot regelmatige of structurele file (CIA - Rijkswaterstaat, 2024). Daarnaast wordt de norm $\frac{I}{C} \leq 0,8$ ook binnen de Richtlijnen Ontwerp Autosnelwegen (ROA) gebruikt als uitgangspunt bij het ontwerpen van autosnelwegen (ROA, 2019).

De berekening van het aantal benodigde rijstroken is opgenomen in Bijlage 9 en de resultaten zijn weergegeven in Tabel 5. Hierbij is in de laatste kolom het benodigde type verbindingsweg vastgesteld door, van de typen die zijn bepaald voor de ochtend- en avondspits, het type te hanteren met het hoogste aantal rijstroken of de hoogste kwaliteitswaarde.

Tabel 5: Overzicht berekening aantal rijstroken en type verbindingsweg per verkeersstroom (CIA - Rijkswaterstaat, 2024)

Verkeersstroom	Ochtendspits		Avondspits		Maatgevende type verbindingsweg
	Benodigde capaciteit bij $I/C \leq 0,8$	Benodigde type verbindingsweg	Benodigde capaciteit bij $I/C \leq 0,8$	Benodigde type verbindingsweg	
A15 West → Calandbrug	89	Klaverbladlus	188	Klaverbladlus	Klaverbladlus
A15 West → Thomassentunnel*	1388	-	2750	-	-
A15 West → N57	34	Klaverbladlus	233	Klaverbladlus	Klaverbladlus
Calandbrug → A15 West	129	Klaverbladlus	183	Klaverbladlus	Klaverbladlus
Calandbrug → N57	251	Klaverbladlus	630	Klaverbladlus	Klaverbladlus
N57 → Calandbrug	756	Klaverbladlus	481	Klaverbladlus	Klaverbladlus
N57 → Thomassentunnel	2013	2 stroken (geen lus)	814	Klaverbladlus	2 stroken (geen lus)
N57 → A15 West	261	Klaverbladlus	86	Klaverbladlus	Klaverbladlus
Thomassentunnel → A15 West*	2830	-	1285	-	-
Thomassentunnel → N57	1356	Klaverbladlus	2745	2 stroken (geen lus)	2 stroken (geen lus)

* De verkeersstromen A15 West ↔ Thomassentunnel worden verbonden door de autosnelweg de A15.

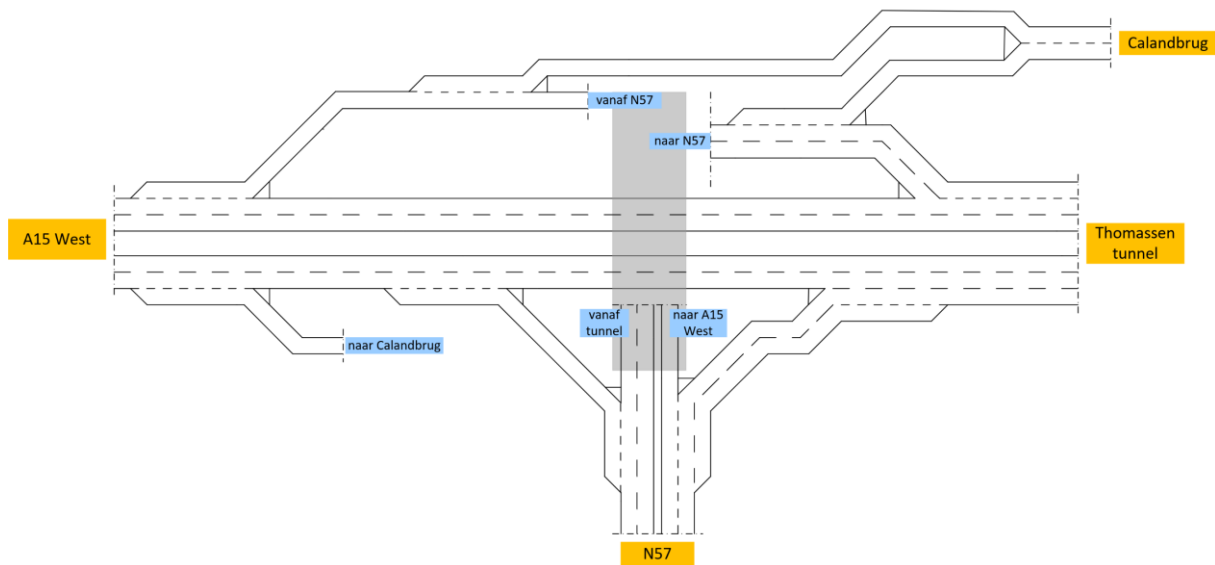
Uit de berekening volgt dat voor alle verbindingen, behalve N57 → Thomassentunnel en Thomassentunnel → N57, een klaverbladlus met één rijstrook, ofwel een indirecte verbinding, toereikend is. Voor de verbindingen tussen de N57 en de Thomassentunnel daarentegen zijn twee rijstroken nodig, waardoor dit een semirecte of directe verbinding vereist. Dit komt doordat deze verkeersstroom in de ochtendspits maatgevend is in de richting N57 → Thomassentunnel, terwijl de andere richting (Thomassentunnel → N57) in de avondspits maatgevend is.

De verkeersstromen tussen de A15 West en de Thomassentunnel worden verbonden door de autosnelweg de A15. Uit de berekening in Bijlage 9 volgt dat voor zowel de verkeersstroom A15 West → Thomassentunnel als Thomassentunnel → A15 West een rijbaan met twee rijstroken toereikend is.

6.1.2 Rijstrokenschema en ligging van discontinuïteiten

In een rijstrokenschema wordt vastgelegd hoeveel rijstroken op welke plek in het knooppunt nodig zijn en wordt daarnaast aangegeven hoe discontinuïteiten elkaar opvolgen (Rijkswaterstaat, 2019). In Figuur 17 is het rijstrokenschema van het nieuwe ontwerp van de Harmsenknoop weergegeven. Hierbij is de ligging van de discontinuïteiten bepaald op basis van de minimale turbulentielengtes voor niet-hoofdbanen volgens Tabel 6.6 van de Richtlijnen Ontwerp Autosnelwegen (ROA). Tabel 6.6 van de ROA is weergegeven in Bijlage 13.

Na het voltooien van het Elementair Ontwerp (Hoofdstuk 7) wordt gecontroleerd of de ideale ontwerpvariant voldoet aan de minimale turbulentielengtes. Na de keuze van de geschikte knooppuntvorm en het opstellen van de vilstiftenschets wordt in paragraaf 6.4 het type van de verschillende discontinuïteiten uitgewerkt.



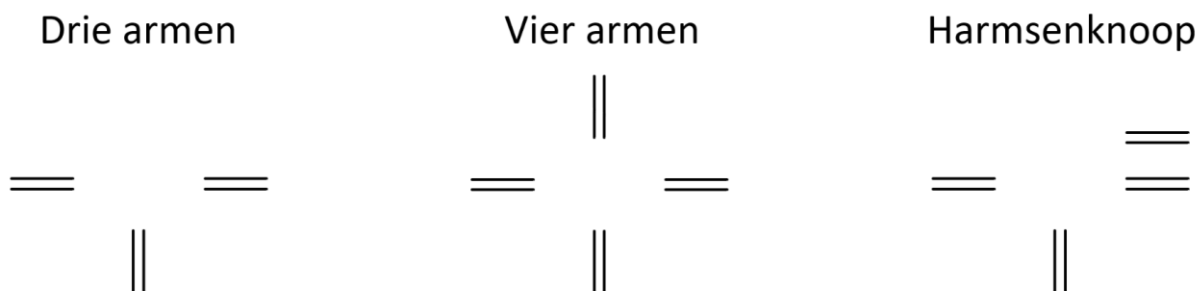
Figuur 17: Rijstrokenschema van het nieuwe ontwerp van de Harmsenknoop

6.2 Keuze voor de geschikte knooppuntvorm

De keuze voor de geschikte knooppuntvorm voor het ideale ontwerp van de Harmsenknoop is afhankelijk van de wegcategorieën van de samenkomende wegen. Uit Tabel 43 in Bijlage 10 blijkt dat alle wegvakken op de Harmsenknoop ofwel een regionale stroomweg ofwel een autosnelweg zijn. Beide vallen volgens de CROW onder zogenoemde stroomwegen, waardoor verbindingen tussen deze wegen met ongelijkvloerse kruisingen (knooppunten) moet gebeuren (CROW - Wegontwerp BBK, 2025). Dit betekent dat de genoemde aansluitingsvormen in Hoofdstuk 4 van de ROA, zoals de Haarlemmermeer- en half-klaverbladaansluiting, afvallen voor het ontwerp van de Harmsenknoop.

Omdat zowel de N57 als de N15 over de Calandbrug gescheiden rijbanen hebben, kan volgens de ROA dezelfde redenering bij een knooppunt tussen een regionale en nationale stroomweg worden gebruikt als bij een knooppunt tussen twee nationale stroomwegen (autosnelwegen) (ROA, 2019). Hierdoor kunnen alle verbindingswegen van de Harmsenknoop worden ontworpen volgens de ROA, waarbij ze omwille van de verkeersveiligheid en robuustheid verplicht een vluchtstrook moeten hebben.

De ROA geeft standaard knooppuntconfiguraties voor driearmige en vierarmige knooppunten. De Harmsenknoop heeft vier armen (A15 West, Calandbrug, N57 en Thomassentunnel), maar lijkt door de parallelle ligging van de Calandbrug en Thomassentunnel wellicht meer op de T-vorm van de driearmige knooppuntconfiguraties. Hierdoor wordt zowel gekeken naar de drie- en vierarmige configuraties uit de ROA. Indien een driearmige standaardconfiguratie als basis wordt genomen, dient deze vervolgens uitgebreid te worden met verbindingen richting de Calandbrug, zodat het ontwerp alle verkeersstromen uit het programma van eisen accommodeert. De ligging van de armen bij drie- en vierarmige knooppuntconfiguraties en bij de Harmsenknoop is weergegeven in Figuur 18.



Figuur 18: Ligging van de armen bij driearmige en vierarmige knooppuntconfiguraties en bij de Harmsenknoop

In Bijlage 10 worden de standaardknooppuntconfiguraties uit de ROA weergegeven en wordt daarnaast in detail beschreven hoe tot de geschikte knooppuntvorm voor de Harmsenknoop is gekomen. Hieronder worden de belangrijkste afwegingen beschreven.

Importantie van afbuigende stromen

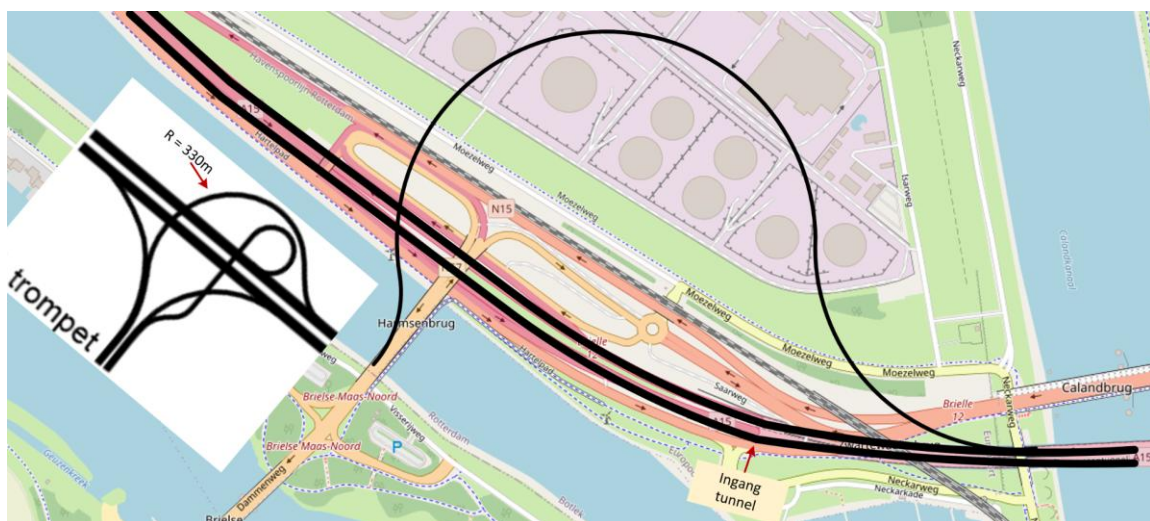
Uit de analyse in Bijlage 10 volgt dat de Harmsenknoop slechts één afbuigende stroom heeft die met een (semi)directe verbinding moet worden gerealiseerd, namelijk de verkeersstroom N57 ↔ Thomassentunnel. Dit betekent dat negen knooppuntconfiguraties uit de ROA mogelijk kunnen zijn voor de Harmsenknoop. Deze mogelijke configuraties zijn weergegeven in Figuur 74 in Bijlage 10.

Beschikbare ruimte in de omgeving

De keuze voor de knooppuntvorm voor het herontwerp van de Harmsenknoop is afhankelijk van de beschikbare ruimte in de omgeving en de benodigde ruimte per configuratie. Uit de harde randvoorwaarden volgt namelijk dat het knooppunt tussen het Hartelkanaal en de opslagterminals van de Haven van Rotterdam moet passen, waarbij ook de Moezelweg en Havenspoorlijn in acht worden genomen.

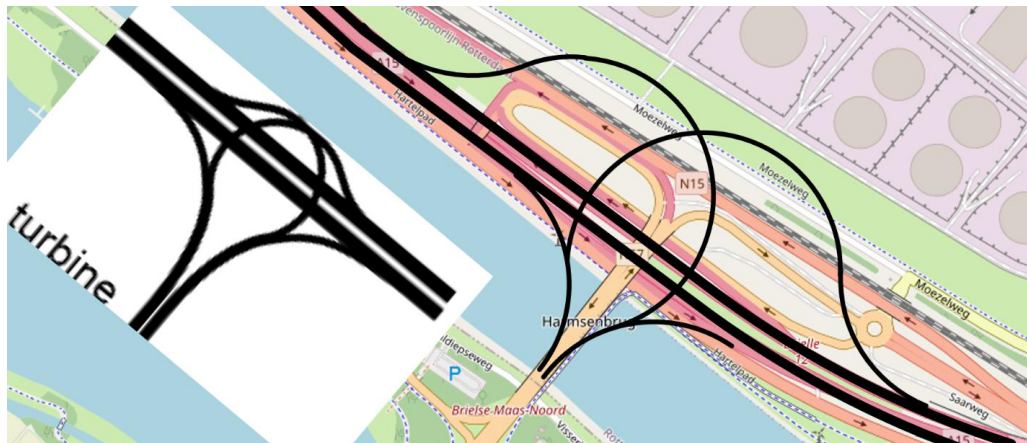
De benodigde ruimte voor de verbindingswegen is afhankelijk van de ontwerpsnelheid en bijbehorende boogstraal. Uit de analyse in Bijlage 10 en uit Tabel 5.12 van de ROA volgt dat een directe verbinding een ontwerpsnelheid van 70 of 90 km/h heeft, waarbij een ontwerpsnelheid van 90 km/h een minimale boogstraal van 330 meter nodig heeft (ROA, 2019).

Figuur 19 laat zien dat een fly-over met een boogstraal van 330 meter niet past in de omgeving van de Harmsenknoop, omdat deze over de opslagterminals gaat. Daarnaast is de boogstraal van 330 meter niet aansluitbaar op de huidige tunnelmond van de Thomassentunnel. Dit betekent dat configuraties met een fly-over met een boogstraal van meer dan 300 meter niet geschikt zijn voor de Harmsenknoop.



Figuur 19: Fly-over met een boogstraal van 330 meter gaat over opslagterminals en sluit niet aan op de snelweg voor de tunnel. Deze configuratie valt daarmee buiten de randvoorwaarden.

Verder mogen volgens de harde randvoorwaarden (paragraaf 5.1.1) geen extra overspanningen boven het Hartelkanaal gemaakt worden, omdat de nieuwe verbindingswegen moeten aansluiten op de bestaande landhoofden van de Harmsenbrug. Voor de verbindingen A15 West → N57 en N57 → Thomassentunnel kunnen om deze reden geen turbine verbindingen met een ontwerpsnelheid van 70 km/h worden aangesloten op de huidige ligging van de snelweg. In Figuur 20 is dit weergegeven voor een turbineconfiguratie, waarbij de boogstralen van 180 meter boven het Hartelkanaal uitkomen. Hierdoor vallen ook de turbineconfiguraties af voor het nieuwe ontwerp van de Harmsenknoop.



Figuur 20: Turbineconfiguratie zorgt voor verbindingen over het Hartelkanaal en dat valt buiten de harde randvoorwaarden

Verbeterde en gemodificeerde klaverbladconfiguratie

Uit de analyse in Bijlage 10 volgt dat enkel de verbeterde en gemodificeerde klaverbladconfiguraties overblijven als mogelijke knooppuntvormen voor de Harmsenknoop.

Omdat een (semi)directe verbinding tussen de N57 en Thomassentunnel nodig is, wordt vanwege de omvang van de verkeersintensiteit van deze verbinding gekozen om de directe verbindingswegen van het gemodificeerde klaverblad als basis te nemen voor het nieuwe ontwerp van de Harmsenknoop. De (semi)directe verbinding van deze configuratie bestaat namelijk uit een vloeiende bocht, in tegenstelling tot die van het verbeterde klaverblad.

Hoewel de directe verbinding van het gemodificeerde klaverblad wordt gebruikt voor het opstellen van het nieuwe ontwerp, worden op de Harmsenknoop geen klaverbladlussen toegepast. Dit komt enerzijds door het gebrek aan beschikbare ruimte en anderzijds lijkt de Harmsenknoop meer op een driearmige configuratie met een extra aansluiting aan de rechterkant voor de Calandbrug. De viltstiftenschets van de ideale ontwerpvariant is weergegeven in Figuur 21 in paragraaf 6.3.

Ontwerpkeuzes

De (semi)-directe verbindingen $N57 \leftrightarrow$ Thomassentunnel zijn samen met de hoofdverbinding $A15$ West \leftrightarrow Thomassentunnel (snelweg) de belangrijkste verbindingen op het knooppunt. Deze verbindingen worden volgens de stromenanalyse als eerste gerealiseerd, waarna de andere verbindingswegen om deze hoofdverbindingen heen gerealiseerd dienen te worden

Om een (semi)directe verbinding met een ontwerpsnelheid van 70 km/h tussen de N57 en de Thomassentunnel mogelijk te maken, wordt gewerkt met de minimale toelaatbare boogstraal bij een ontwerpsnelheid van 70 km/h volgens de ROA. Volgens tabel 5.12 van de ROA is dit een boogstraal van 160 meter met een verkanting van 7,0%. Deze bocht gaat over de spoorlijn en komt gedeeltelijk boven de Moezelweg. Hoewel het voor de ideale ontwerpvariant toegestaan is om de bespreekbare randvoorwaarden over het behoud van de verticale ligging van de spoorlijn en de Moezelweg niet in acht te nemen, wordt bij de uitwerking van het verticale alignment in het Elementair Ontwerp in paragraaf 7.2 onderzocht of het noodzakelijk is om de hoogteligging van de spoorlijn aan te passen aan de verticale ligging van deze verbindingsweg.

Om te voorkomen dat de verbinding van de A15 West \rightarrow N57 boven het Hartelkanaal uitkomt, wordt de A15 na de Thomassentunnel meer naar het noorden gelegd. Dit gebeurt met een S-boog met een boogstraal van 750 meter en een verkanting van 5,0%. Dit is de minimaal toelaatbare boogstraal bij bogen met een ontwerpsnelheid van 120 km/h volgens Tabel 5.12 van de ROA.

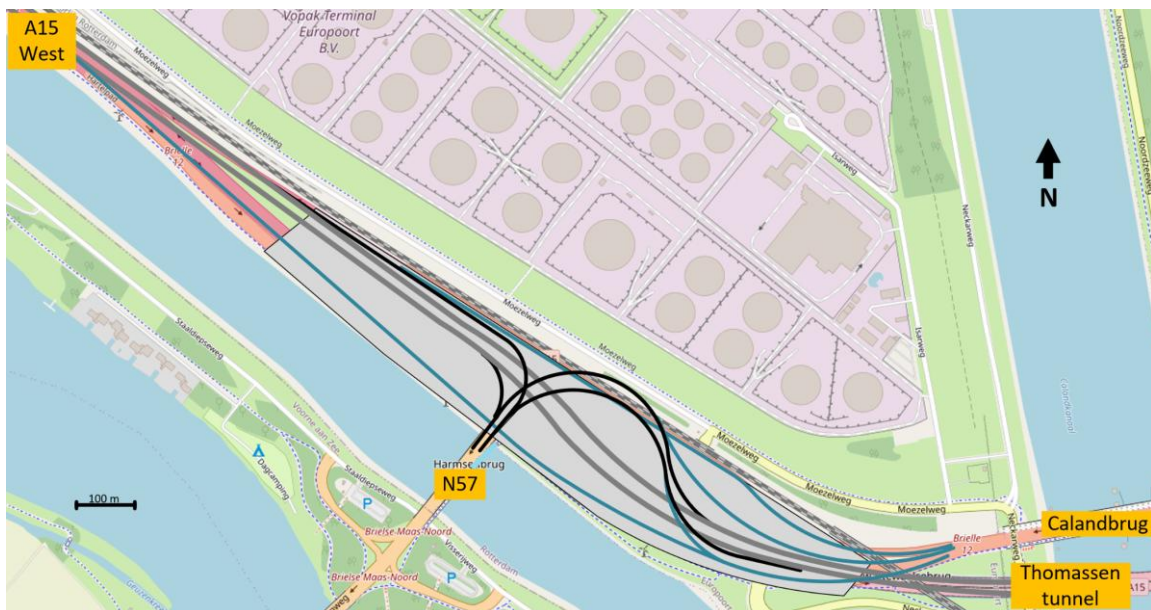
De verbindingswegen Calandbrug \leftrightarrow N57 worden aangesloten op de verbindingswegen $N57 \leftrightarrow$ Thomassentunnel, zodat ruimte wordt bespaard door het samenvoegen van de verbindingswegen. Het

verkeer van deze stromen wordt nu met een samengevoegde verbindingsweg over de A15 en de Harmsenbrug geleid, in plaats van via twee parallelle verbindingen. Daarnaast volgen de verbindingswegen van en naar de Calandbrug zo veel mogelijk de bestaande route, omdat de huidige ligging zorgt voor ongelijkvloerse kruisingen met de A15 in de Thomassentunnel en de Havenspoorlijn.

De ideale ontwerpvariant is, vanwege de semidirecte verbinding tussen de N57 en Thomassentunnel, alleen mogelijk als de aansluiting tussen de Harmsenknoop en de Moezelweg wordt weggelaten. Dit betekent dat de bespreekbare randvoorwaarde over het behoud van deze aansluiting niet in acht wordt genomen. Het verwijderen van de aansluiting maakt het mogelijk dat de ideale ontwerpvariant volledig wordt gecreëerd met ongelijkvloerse verbindingen. Door de aansluiting tussen de Harmsenknoop en de Moezelweg te verwijderen, moet het bestemmingsverkeer van de Moezelweg omrijden. De routes voor het omrijdende verkeer worden in Bijlage 12 in kaart gebracht.

6.3 Viltstiftenschets

Op basis van de keuze voor de geschikte knooppuntconfiguratie en de bijbehorende ontwerpkeuzes wordt een viltstiftenschets opgesteld. In Figuur 21 is de viltstiftenschets van de ideale ontwerpvariant weergegeven. De bogen en de horizontale ligging van het ontwerp zijn hierbij op schaal getekend. Daarnaast geeft Tabel 6 een overzicht van de eerste opzet van de verticale ligging van de verbindingswegen van deze ideale ontwerpvariant.



Figuur 21: Viltstiftenschets ideale ontwerpvariant op basis van een gemodificeerd klaverbladconfiguratie

Tabel 6: Eerste opzet van de verticale ligging van verbindingswegen van de ideale ontwerpvariant

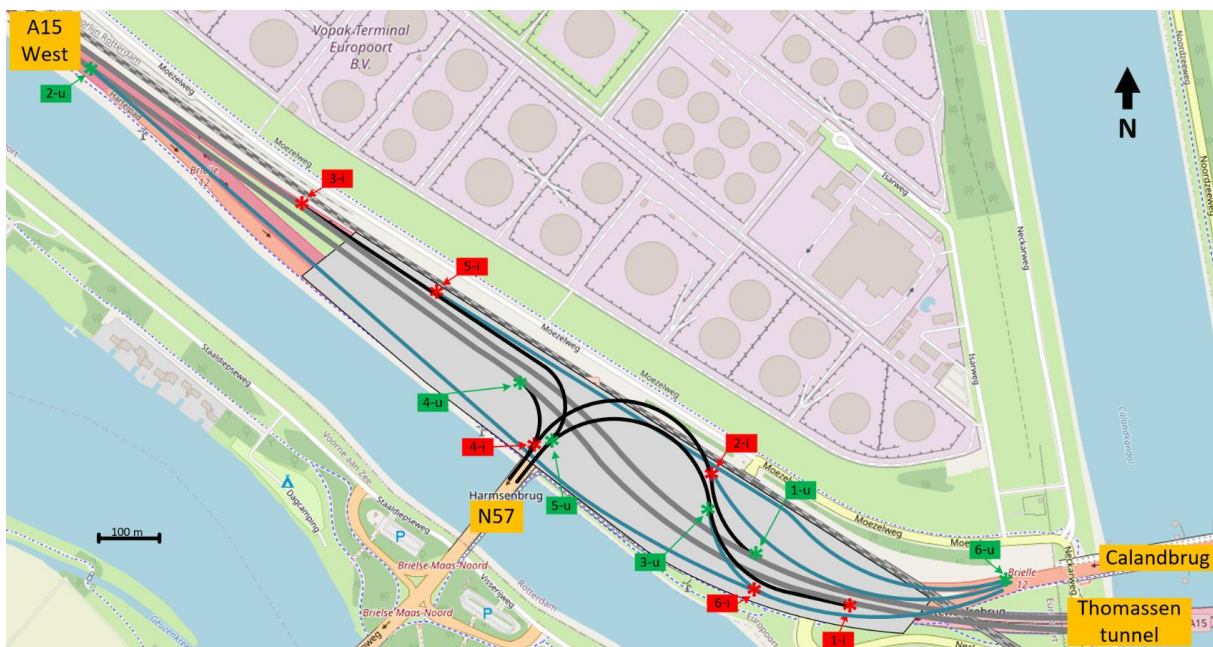
Verkeersstroom	Hoogteligging verbindingswegen		
	Start	Midden	Einde
A15 West → Calandbrug	Op maaiveld	Op maaiveld	Verhoogd 1 ^e niveau
A15 West → Thomassentunnel	Op maaiveld	Op maaiveld	Half verdiept
A15 West → N57	Op maaiveld	Verhoogd 1 ^e niveau	Verhoogd 1 ^e niveau
Calandbrug → A15 West	Verhoogd 1 ^e niveau	Op maaiveld	Op maaiveld
Calandbrug → N57	Verhoogd 1 ^e niveau	Verhoogd 2 ^e niveau	Verhoogd 1 ^e niveau
N57 → Calandbrug	Verhoogd 1 ^e niveau	Verhoogd 1 ^e niveau	Verhoogd 1 ^e niveau
N57 → Thomassentunnel	Verhoogd 1 ^e niveau	Verhoogd 1 ^e niveau	Half verdiept
N57 → A15 West	Verhoogd 1 ^e niveau	Verhoogd 1 ^e niveau	Op maaiveld
Thomassentunnel → A15 West	Half verdiept	Op maaiveld	Op maaiveld
Thomassentunnel → N57	Half verdiept	Verhoogd 2 ^e niveau	Verhoogd 1 ^e niveau

In paragraaf 6.4 wordt op basis van de viltstiftenschets van de ideale ontwerpvariant de bijbehorende ligging van de discontinuïteiten geanalyseerd. Verder worden in het Elementair Ontwerp (Hoofdstuk 7) zowel het horizontale als verticale alignment in meer detail uitgewerkt en worden de bijbehorende ontwerpkeuzes nader toegelicht.

6.4 Type discontinuïteiten

Met behulp van het rijstrokenschema en de viltstiftenschets kan de ligging van de verschillende discontinuïteiten op het knooppunt in kaart worden gebracht. Volgens de Richtlijnen Ontwerp Autosnelwegen (ROA) is een discontinuïteit een overgang tussen twee verschillende wegvakken, waarbij rijbanen samenkomen of uit elkaar gaan of waarbij een vermeerdering of vermindering van het aantal rijstroken plaatsvindt (ROA, 2019).

In Figuur 22 is een overzicht weergegeven van de locatie en labels van de verschillende discontinuïteiten van het nieuwe ontwerp van Figuur 21. Hierbij verwijzen de labels 1-i, 2-i, enzovoorts naar de invoegingen en samenvoegingen, terwijl 1-u, 2-u, enzovoorts verwijzen naar de uitvoegingen en splitsingen van rijbanen.



Figuur 22: Ligging van de discontinuïteiten van de ideale ontwerpvariant

In Bijlage 11 is voor elke discontinuïteit het type weergegeven, met daarbij het aantal rijstroken van de doorgaande rijbaan en het aantal rijstroken van de invoegende, uitvoegende, samenkommende of splitsende rijbanen. Hieronder worden enkel de bijzondere discontinuïteiten beschreven. Voor de analyse van alle discontinuïteiten van het ideale ontwerp wordt verwezen naar Bijlage 11.

Discontinuïteiten 1-i en 1-u zijn een samenvoeging en splitsing, omdat de A15 in de Thomassentunnel drie rijstroken heeft, maar aan de westkant van de discontinuïteiten 1-i en 1-u verdergaat met twee rijstroken op elke rijbaan.

Discontinuïteit 6-i is een samenvoeging met twee rijstroken richting de Calandbrug, omdat de rotonde bij de Moezelweg vervalt en de Calandbrug uit 2x2 rijstroken bestaat.

Discontinuïteit 5-u betreft een 1+2 splitsing, wat volgens de ROA minder wenselijk is dan een 2+1 splitsing, vanwege de verkapte uitvoeging aan de linkerkant. Deze splitsing is hier toepasbaar, omdat het geen hoofdrijbaan betreft en de wegcategorie pas 750 meter na de splitsing overgaat van regionale stroomweg naar autosnelweg. Vanwege het ruimtegebrek is daarom gekozen voor deze oplossing.

Hoewel in dit onderzoek de eerste resultaten van de verkeersveiligheids- en doorstromingsaspecten van onder andere discontinuïteit 5-u worden geanalyseerd met de microsimulatie, zoals beschreven in Hoofdstuk 10 tot en met 12, is het belangrijk te vermelden dat de gevolgen op het gebied van de werklast van de bestuurder en de verkeersveiligheid nader moeten worden onderzocht in een vervolgonderzoek. Deze aanbeveling is opgenomen in paragraaf 13.5 van de Discussie.

De lengtes van in- en uitvoegstroken zijn afhankelijk van de benodigde acceleratie- en deceleratielengte. Hiervoor is volgens paragraaf 6.1 van de ROA het bijbehorende hellingspercentage noodzakelijk om de benodigde lengtes te berekenen. Het verticale alignment en bijbehorende hellingspercentages worden in het Elementair Ontwerp (Hoofdstuk 7) uitgewerkt, waardoor de lengtes van de in- en uitvoegstroken pas na paragraaf 7.2 kunnen worden berekend.

6.5 Overzicht ontwerpkeuzes Functioneel Ontwerp

In deze paragraaf wordt een overzicht gegeven van de ontwerpkeuzes die in het Functioneel Ontwerp bij het opstellen van de ideale ontwerpvariant zijn gemaakt.

1. Benodigde aantal rijstroken per verkeersstroom bepalen met de norm $\frac{I}{C} \leq 0,8$.
 - Op basis van de verwachte verkeersintensiteiten in 2040 en de capaciteitswaarden uit het Handboek Capaciteiten Infrastructuur Autosnelwegen (CIA).
2. Ligging van discontinuïteiten bepalen op basis van de minimale turbulentieafstanden uit Tabel 6.6 van de Richtlijnen Ontwerp Autosnelwegen (ROA).
3. Op basis van de wegcategorieën (regionale stroomweg en autosnelweg) mogen geen aansluitingsvormen worden toegepast, maar moet een knooppuntconfiguratie worden gekozen.
4. Het type van de verbindingswegen bepalen op basis van het benodigde aantal rijstroken.
5. Turbineknooppuntconfiguraties vallen af, omdat deze verbindingswegen boven het Hartelkanaal uitkomen (harde randvoorwaarde 5).
6. Knooppuntconfiguraties met boogstralen groter dan 300 meter vallen af, omdat ze over de opslagterminals van de Rotterdamse Haven uitkomen (harde randvoorwaarde 6).
7. De (semi)-directe verbindingen N57 ↔ Thomassentunnel zijn samen met de hoofdverbinding A15 West ↔ Thomassentunnel (snelweg) de belangrijkste verbindingen op het knooppunt.
 - Deze verbindingen worden volgens de stromenanalyse als eerste gerealiseerd, waarna de andere verbindingswegen om deze hoofdverbindingen heen gelegd dienen te worden.
8. De directe verbinding uit het gemodificeerde klaverblad van de ROA wordt gebruikt om de (semi)-directe verbinding tussen N57 ↔ Thomassentunnel te realiseren.
 - De minimale boogstraal is 160 meter voor een ontwerpsnelheid van 70 km/h volgens Tabel 5.12 van de ROA.
9. De snelweg wordt met een S-boog met een boogstraal van 750 meter meer naar het noorden gelegd, om te voorkomen dat de verbindingsweg A15 West → N57 boven het Hartelkanaal uitkomt. Deze boogstraal is conform Tabel 5.12 uit de ROA bij een ontwerpsnelheid van 120 km/h.
10. De verbindingswegen Calandbrug ↔ N57 worden aangesloten op de verbindingswegen N57 ↔ Thomassentunnel om ruimte te besparen.
11. De verbindingswegen van en naar de Calandbrug blijven zo veel mogelijk de bestaande route volgen, zodat de huidige spoorbruggen behouden kunnen blijven om de ongelijkvloerse kruisingen met de A15 in de Thomassentunnel en de Havenspoorlijn te realiseren.
12. De aansluiting tussen de Harmsenknoop en Moezelweg wordt weggelaten in de ideale ontwerpvariant om gelijkvloerse aansluitingen te voorkomen. Daarnaast geeft dit meer ruimte voor het realiseren van de (semi)-directe verbindingen tussen de Calandbrug, Thomassentunnel en N57.

13. Het type van de discontinuïteiten wordt bepaald op basis van het aantal doorgaande rijstroken en het aantal in- of uitvoegende, samenkomende of splitsende rijstroken. De mogelijkheden zijn beschreven in paragraaf 4.6 van de ROA.

Met deze ontwerpkeuzes voldoet het Functioneel Ontwerp (FO) van de ideale ontwerpvariant aan het programma van eisen en zijn de harde randvoorwaarden in acht genomen. Zo zijn de eisen ten aanzien van de wegcategorie meegenomen in het FO door de Harmsenknoop als knooppunt met ongelijkvloerse kruisingen te ontwerpen. Daarnaast zijn alle tien de gewenste verkeersstromen geacommodeerd. Bij de afweging van de geschikte knooppuntconfiguratie zijn de harde randvoorwaarden gebruikt, zodat het ideale ontwerp de ruimtelijke beperkingen in acht neemt.

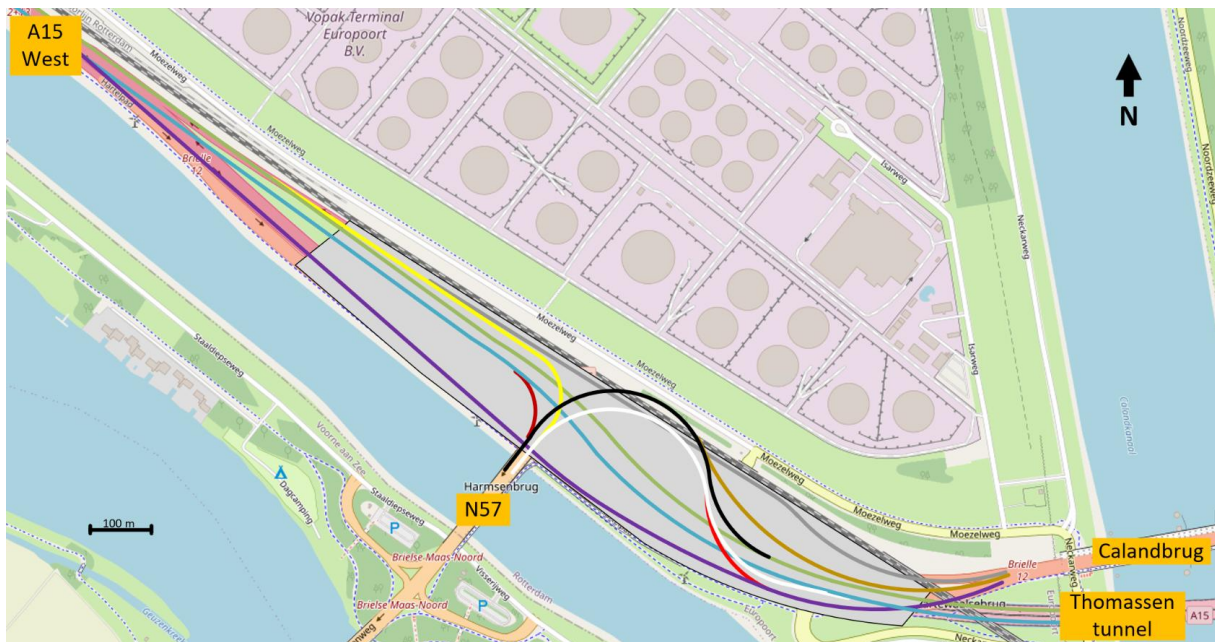
In het volgende hoofdstuk wordt het Functioneel Ontwerp uitgewerkt tot een Elementair Ontwerp.

7. Elementair Ontwerp

In dit hoofdstuk wordt het Functioneel Ontwerp van de ideale ontwerpvariant uitgewerkt tot een Elementair Ontwerp. Hierbij worden de boogstralen, minimale rechtstanden en benodigde overgangsbogen onderzocht voor het horizontale alignment. Verder wordt bij het verticale alignment gekeken naar de hoogteligging van de wegvakken en bijbehorende hellingen. Vervolgens worden de lengtes van in- en uitvoegstroken bepaald en worden de gehanteerde turbulentieafstanden gecontroleerd. Tot slot wordt ingegaan op het dwarsprofiel van de wegen, de mogelijkheden voor het realiseren van het ideale ontwerp en de gemaakte ontwerpkeuzes.

7.1 Horizontaal alignment

In het Functioneel Ontwerp (Hoofdstuk 6) is de eerste opzet van het horizontaal alignment van de ideale ontwerpvariant van de Harmsenknoop gemaakt. In het Elementair Ontwerp worden de ontwerpkeuzes van het horizontaal alignment en bijbehorende boogstralen in detail uitgewerkt. Hiervoor wordt elke verbinding uit de viltstiftenschets van het Functioneel Ontwerp (Figuur 21) weergegeven met een andere kleur, zodat ze duidelijk uit elkaar gehouden kunnen worden. Figuur 23 geeft de viltstiftenschets met verschillende kleuren voor de verbindingswegen weer.



Figuur 23: Viltstiftenschets ideale ontwerpvariant met verschillende kleuren voor de tien verkeersstromen

In Bijlage 14 wordt in detail beschreven hoe het horizontale alignment van de ideale ontwerpvariant is uitgewerkt. Hieronder worden de belangrijkste afwegingen beschreven.

Boogstralen en verkanting

De gebruikte boogstralen voor het ideale ontwerp van de Harmsenknoop zijn gekozen aan de hand van de ontwerpsnelheden en bijbehorende minimaal toegestane boogstralen volgens de zichteisen uit de Richtlijnen Ontwerp Autosnelwegen (ROA).

Vanwege de beperkte beschikbare ruimte is bij de keuze voor de boogstralen steeds de minimaal toegestane boogstraal gekozen, zodat het ideale ontwerp conform de richtlijnen is en binnen de harde randvoorwaarden blijft.

Tabel 7 geeft een overzicht van de verschillende verbindingswegen, bijbehorende kleur, ontwerpsnelheid, verkanting en de gekozen boogstraal. Voor extra toelichting van de gekozen ontwerpsnelheden en boogstralen wordt verwezen naar Bijlage 14.

Tabel 7: Ideale ontwerp: overzicht van de ontwerpparameters en de gekozen boogstraal (ROA, 2019)

Verkeersstroom	Kleur	Ontwerpsnelheid	Verkanting	Boogstraal
A15 West → Calandbrug	Paars	90 km/h	2,5 %	675 m
A15 West → Thomassentunnel	Lichtblauw	120 km/h	5%	750 m
A15 West → N57	Roodbruin	50 km/h	6,5%	80 m
Calandbrug → A15 West	Grijs	90 km/h	6%	330 m
Calandbrug → N57	Goud	70 km/h	2,5%	400 m
N57 → Calandbrug	Rood	70 km/h	7%	160 m
N57 → Thomassentunnel	Wit	70 km/h	7%	160 m
N57 → A15 West	Geel	50 km/h	6,5%	80 m
Thomassentunnel → A15 West	Lichtgroen	120 km/h	5%	750 m
Thomassentunnel → N57	Zwart	70 km/h	7%	160 m

Overgangsbogen

Om een geleidelijke overgang tussen een rechtstand en een boog of twee opeenvolgende bogen te realiseren, wordt een overgangsboog toegepast. Een overgangsboog zorgt onder andere voor een geleidelijke stuurverdraaiing en een vloeiende vormgeving van het wegontwerp in bogen (ROA, 2019). Daarnaast maakt de overgangsboog deel uit van de acceleratielengte van een invoegstrook, waardoor deze lengte moet worden meegenomen bij het bepalen van de totale lengte van de invoegstrook.

In Bijlage 14 wordt de berekening van de overgangsbogen van de ideale ontwerpvariant uitgewerkt. Hierbij wordt als overgangsboog een clothoïde toegepast, waarbij de clothoïdeparameter A wordt bepaald aan de hand van eisen vanuit het zicht en comfort. De lengte van de overgangsboog wordt vervolgens berekend met de boogstraal en clothoïdeparameter A.

Verkantingsovergang in overgangsbogen

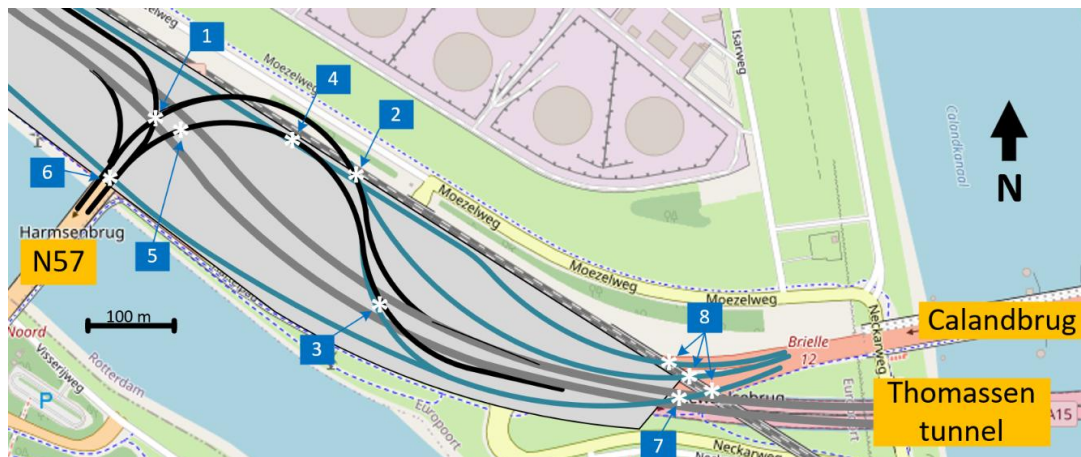
Naast een geleidelijke overgang tussen de rechtstanden en (opeenvolgende) bogen, zorgt een overgangsboog ook voor een geleidelijke overgang van de verkanting. Dit wordt niet verder uitgewerkt in dit onderzoek, omdat deze ontwerpaspecten niet in de microsimulatie kunnen worden ingevoerd. Het wordt aangeraden om met een vervolgonderzoek te bepalen of de berekende lengtes van de overgangsbogen toereikend zijn voor de verkantingsovergang. Deze aanbeveling is opgenomen in paragraaf 13.5 van de Discussie.

Zicht in bogen

Binnen de bogen op de Harmsenknoop bevinden zich geen zicht beperkende objecten, waardoor de gebruikte boogstralen volgens Tabel 5.12 van de ROA voldoen aan de zichteisen. Wel wordt aangeraden om een vervolgonderzoek te doen naar de ervaring en het daadwerkelijke zicht van de weggebruikers in de bogen van de Harmsenknoop, zodat de gevolgen hiervan kunnen worden geanalyseerd. Aandachtspunten zijn hierbij de in- en uitvoeringen die midden in de boog van de verbindingswegen N57 ↔ Thomassentunnel geplaatst zijn. Deze aanbeveling is opgenomen in paragraaf 13.5 van de Discussie.

7.2 Verticaal alignement

In Tabel 6 van het Functioneel Ontwerp is een eerste opzet van het verticale alignement weergegeven. Om de hellingspercentages van alle wegvakken van het ideale ontwerp van de Harmsenknoop te bepalen, zijn voor elke verbindingsweg de benodigde begin- en eindhoogte nodig. Daarnaast moeten op de punten waar verbindingswegen elkaar ongelijkvloers kruisen voldoende vrije ruimte (hoogte) tussen de verbindingswegen worden gecreëerd. Figuur 24 geeft een overzicht van de ligging en labels van de ongelijkvloerse kruisingen. Deze ongelijkvloerse kruisingen worden in Bijlage 15 in detail geanalyseerd. Daarnaast gaat Bijlage 15 in op de bepaling van de hellingspercentages van de wegvakken van het ideale ontwerp. Hieronder worden de belangrijkste afwegingen beschreven.



Figuur 24: Overzicht ligging van de ongelijkvloerse kruisingen van het ideale ontwerp

Thomassentunnel → N57: ongelijkvloerse kruising met verbindingsweg N57 → A15 West en met de snelweg de A15

Op ongelijkvloerse kruising 1 moeten drie verbindingswegen boven elkaar worden gerealiseerd, namelijk die van de Thomassentunnel → N57, N57 → A15 West en de snelweg de A15 (A15 West ↔ Thomassentunnel). Uit de analyse van Bijlage 15 volgt dat de A15 zoveel mogelijk de huidige hoogteligging moet behouden, waardoor deze op +5,00 meter boven NAP komt te liggen (AHN, z.d.).

Het verticale profiel van vrije ruimte voor voertuigen is volgens de Richtlijnen Ontwerp Autosnelwegen 4,60 meter. In Bijlage 15 wordt aangenomen dat de constructiehoogte van de verbindingswegen 1,75 meter is, waardoor deze gelijk is aan de hoogte van de constructie van de Harmsenbrug.

De bovenkant van de verbindingsweg N57 → A15 West komt daarmee op +11,35 meter te liggen. De verbindingsweg van de Thomassentunnel → N57 wordt boven de verbindingsweg van de N57 → A15 West gerealiseerd, zodat enerzijds de verbindingswegen elkaar niet gelijkvloers kruisen en zodat anderzijds extra hoogte wordt verkregen bij de ongelijkvloerse kruising met de Havenspoorlijn. De verbindingsweg Thomassentunnel → N57 ligt zodoende op een hoogte van +17,70 meter.

Thomassentunnel → N57: ongelijkvloerse kruising met de Havenspoorlijn en met verbindingsweg Calandbrug → A15 West

Bij ongelijkvloerse kruising 2 moet de verbindingsweg Thomassentunnel → N57 boven de Havenspoorlijn en de verbindingsweg Calandbrug → A15 West worden gerealiseerd. Het verticale profiel van vrije ruimte van een trein is 6,75 meter (ProRail, 2015).

In Bijlage 15 wordt de huidige ligging van de Havenspoorlijn geanalyseerd en vergeleken met de benodigde ligging ten opzichte van de bovenliggende verbindingsweg Thomassentunnel → N57. Hieruit blijkt dat de Havenspoorlijn bij ongelijkvloerse kruising 2 op een hoogte van +9,45 meter komt te liggen, terwijl de verbindingsweg Thomassentunnel → N57 op +17,95 meter wordt gerealiseerd.

Zodoende kan de verbindingsweg Calandbrug → A15 West bij ongelijkvloerse kruising maximaal op een hoogte van +11,35 meter komen te liggen. De hoogte van deze verbindingsweg wordt bij ongelijkvloerse kruising 4 nader geanalyseerd.

N57 → Thomassentunnel: ongelijkvloerse kruising met verbindingsweg Calandbrug → A15 West

De verbindingsweg N57 → Thomassentunnel gaat niet over de Havenspoorlijn, maar kruist wel met de verbindingsweg Calandbrug → A15 West (ongelijkvloerse kruising 4). Deze verbindingsweg vanaf de Calandbrug wordt in het ideale ontwerp op een hoogte van +5,00 meter gelegd, omdat hij door het weglaten van de aansluiting met de Moezelweg niet meer op een hoogte van +10,40 hoeft te worden gerealiseerd. Daarom komt de verbindingsweg N57 → Thomassentunnel bij ongelijkvloerse kruising 4 op een hoogte van +11,35 meter te liggen.

Overige ongelijkvloerse kruisingen

De overige ongelijkvloerse kruisingen worden in Bijlage 15 geanalyseerd. Hierin zijn ook tekeningen van de hoogteliggingen bij ongelijkvloerse kruisingen 1 en 2 opgenomen.

Hellingspercentages

Door de benodigde hoogtes van de wegvakken op de acht ongelijkvloerse kruisingen en de begin- en eindhoogtes van de wegvakken in acht te nemen, is het mogelijk om de hellingspercentages te bepalen. Het hellingspercentage wordt berekend met de formule (ROA, 2019):

Hellingspercentage:
$$i = \frac{h}{L} * 100\% \quad (7)$$

Hierbij is:

- **i** = het hellingspercentage [%]
- **h** = het hoogteverschil [m]
- **L** = de horizontale lengte van de helling [m]

Tabel 47 in Bijlage 15 geeft een overzicht van de berekende hellingspercentages voor de wegvakken in het ideale ontwerp. Daarnaast is in Bijlage 15 gecontroleerd dat alle wegvakken voldoen aan het maximale hellingspercentage en de maximale lengte waarover deze helling mag worden toegepast (Tabel 5.16 van de ROA). Dit betekent dat het verticale alignment van de ideale ontwerpvariant voldoet aan de richtlijnen.

Top- en voetbogen bij de uiteindes van verticale hellingen

Bij het verticale alignment worden de hellingen afgerond met een topboog (bolle boog) en voetboog (holle boog). Deze worden respectievelijk aan de bovenzijde of onderzijde van de verticale helling geplaatst om een geleidelijke overgang tussen de helling en de rechtstand te creëren. Voor dit onderzoek worden de top- en voetbogen niet uitgewerkt. De reden hiervoor is dat deze ontwerpaspecten niet kunnen worden meegenomen in de analyse met de microsimulatie. Het wordt aangeraden om de bolle en holle bogen met een vervolgonderzoek nader te analyseren. Deze aanbeveling is opgenomen in paragraaf 13.5 van de Discussie.

7.3 Lengte in- en uitvoegstroken en controle van turbulentieafstanden

Nu de hellingen van de wegvakken van de ideale ontwerpvariant van de Harmsenknoop bekend zijn, is het mogelijk om de benodigde lengte van de in- en uitvoegstroken te bepalen. Deze lengtes worden in Bijlage 16 bepaald aan de hand van de acceleratie- of deceleratielengte. Daarnaast zijn nu voldoende aspecten van het ideale ontwerp uitgewerkt om te controleren of het Elementair Ontwerp voldoet aan de minimale turbulentieafstanden volgens Tabel 6.6 van de ROA.

Lengtes in- en uitvoegstroken

Volgens paragraaf 6.4 en Bijlage 11 zijn de discontinuïteiten 2-i, 3-i, 4-1 en 5-i invoegingen, terwijl discontinuïteiten 2-u, 3-u, 4-u uitvoegingen zijn. In Bijlage 16 worden de bijbehorende lengtes van de in- en uitvoegstroken berekend, waarbij rekening wordt gehouden met de ontwerpsnelheid van de doorgaande en toeleidende of afbuigende rijbanen. Hieronder worden de belangrijkste afwegingen beschreven.

Bij invoeging 2-i hebben de toeleidende en doorgaande rijbanen beide een ontwerpsnelheid van 70 km/h. Dit betekent dat het verkeer niet extra hoeft te accelereren om op dezelfde snelheid te komen. De lengte van invoegstrook 2-i wordt vanwege de beperkte ruimte 150 meter lang gemaakt.

Bij invoeging 3-i ligt de invoegstrook op 400 meter na de overgangsboog van de verbindingsweg N57 → A15 West, waardoor het verkeer op de toeleidende rijbaan de benodigde snelheid bereikt. De lengte

van de invoegstrook wordt 200 meter lang gemaakt, zodat het verkeer voldoende ruimte heeft om in te voegen op de snelweg.

Bij discontinuïteit 4-i heeft de invoegstrook van de verbindingsweg A15 West → N57 een helling van -4,5%, waardoor een korte acceleratielengte nodig is. De invoegstrook loopt tot vlak voor de Harmsenbrug, waardoor de lengte van deze invoegstrook 60 meter wordt.

Bij invoeging 5-i rijdt het verkeer op de toeleidende rijbaan 80 km/h, terwijl het verkeer op de doorgaande rijbaan hier accelereert van 50 naar 120 km/h. Dit betekent dat geen extra acceleratielengte nodig is en daarom wordt de lengte van deze invoegstrook 150 meter lang gemaakt.

Bij uitvoeringen 2-u en 4-u hebben de afbuigende rijbanen voldoende lengte voor deceleratie, waardoor de uitvoegstroken 200 meter lang worden gemaakt. 2-u vormt daarmee een weefvlak met de vorige invoeging op de A15 West.

Bij uitvoeging 3-u verandert de snelheid tussen de doorgaande en afbuigende rijbaan niet en hierbij wordt de lengte van de uitvoegstrook 150 meter lang vanwege de beperkte ruimte in deze S-boog.

Splitsing 1-u bevat ook een taperuitvoeging, de dimensionering van deze taperuitvoeging is gelijk aan die in het huidige ontwerp van de Harmsenknoop. Splitsing 5-u bevat een extra rijstrook aan de rechterkant. Deze extra rijstrook begint direct na de Harmsenbrug, zodat het verkeer tijdig van rijstrook kan wisselen.

Controle van de turbulentieafstanden

De beperkte ruimte bij de Harmsenknoop zorgt ervoor dat discontinuïteiten dicht na elkaar moeten worden gerealiseerd. De minimaal benodigde turbulentieafstanden tussen de discontinuïteiten van de Harmsenknoop zijn bepaald op basis van Tabel 6.6 van de ROA. Tabel 48 in Bijlage 17 geeft een overzicht van de minimaal benodigde en de gehanteerde turbulentieafstanden in het ideale ontwerp.

Uit Tabel 48 volgt dat het ideaal ontwerp bij vijf van de zestien turbulentieafstanden niet voldoen aan de minimaal benodigde afstand. Dit komt doordat het ideaal ontwerp moet voldoen aan de harde randvoorwaarden, waardoor de beschikbare ruimte beperkt is. Dit betekent dat aan het ideale ontwerp concessies gedaan moeten worden om binnen deze ruimte te blijven, waardoor niet aan alle benodigde turbulentieafstanden wordt voldaan. In het microsimulatie onderzoek (Hoofdstuk 10 en 11) worden de gevolgen van deze ontwerpconcessies in kaart gebracht en wordt onderzocht of deze kleinere turbulentieafstanden leiden tot doorstromings- en verkeersveiligheidsproblemen.

Twee van deze vijf te korte turbulentielengtes komen doordat te weinig afstand zit tussen een in- en uitvoeging en de tunnelingang van de Thomassentunnel. Omdat de microsimulatie geen rekening houdt met het feit dat het verkeer op de A15 in of uit een tunnel komt, wordt aangeraden om de gevolgen hiervan met een vervolgonderzoek te onderzoeken. Deze aanbeveling is opgenomen in paragraaf 13.5 van de Discussie.

Dimensionering van puntstukken

De dimensionering van de puntstukken bij de discontinuïteiten wordt niet uitgewerkt in dit onderzoek. De reden hiervoor is dat deze ontwerpaspecten niet in de microsimulatie kunnen worden ingevoerd. Het wordt aangeraden om de dimensionering van de puntstukken met een vervolgonderzoek nader te analyseren. Deze aanbeveling is opgenomen in paragraaf 13.5 van de Discussie.

7.4 Dwarsprofiel

Voor de knelpuntenanalyse (Hoofdstuk 8) is een eerste inzicht in de benodigde ruimte voor het dwarsprofiel van de wegen van de Harmsenknoop noodzakelijk. In Bijlage 18 wordt het dwarsprofiel van de ideale ontwerpvariant in detail uitgewerkt. Hierbij is in Tabel 49 een overzicht opgesteld van de verplichte en optionele onderdelen van het dwarsprofiel van elk wegvak. Hieronder worden de belangrijkste afwegingen beschreven.

Voertuigkering en middenberm

Naast de onderdelen uit Tabel 49 is het bij tegengestelde rijbanen met een ontwerpsnelheid van 100 km/h of hoger verplicht om een afschermingsvoorziening of voertuigkering te plaatsen om te voorkomen dat het verkeer van de tegengestelde rijbanen in conflict kunnen komen (ROA, 2019). Tussen de rijbanen van de A15 wordt deze voertuigkering in de middenberm gerealiseerd. Uit de analyse in Bijlage 18 volgt dat de middenberm 8,0 meter breed wordt.

Bochtverbreding

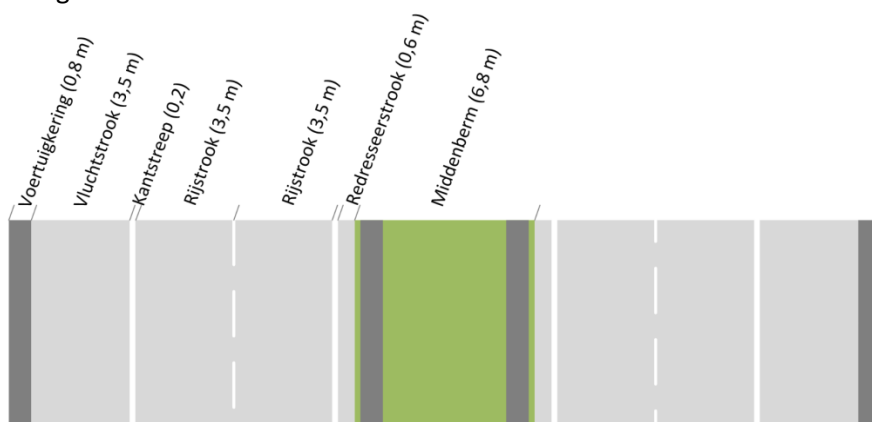
Bij de dwarsprofielen van de verbindingswegen is het noodzakelijk dat bij boogstralen kleiner dan 300 meter gecontroleerd wordt of bochtverbreding nodig is. Bochtverbreding wordt toegepast om het verschil tussen de boogstraal die de voor- en achterwielen van een voertuig doorlopen in een bocht op te vangen (ROA, 2019). De benodigde bochtverbreding voor de bogen van de Harmsenknoop worden berekend in Bijlage 18. Hieruit volgt dat de verbindingswegen A15 West ↔ N57 0,40 meter bochtverbreding nodig hebben, terwijl de verbindingswegen N57 ↔ Thomassentunnel en N57 → Calandbrug 0,20 meter bochtverbreding nodig hebben. Alle verbindingswegen op de Harmsenknoop hebben daarnaast een vluchtstrook aan de binnenzijde van de bocht, conform de ROA.

Overzicht totale breedte van dwarsprofielen

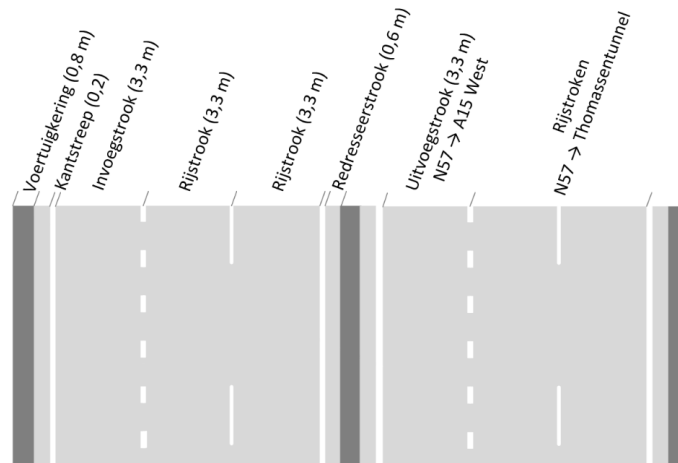
In Tabel 50 in Bijlage 18 wordt voor elke verkeersstroom een overzicht van de afmetingen van de onderdelen van het dwarsprofiel gegeven en wordt de totale breedte van het dwarsprofiel berekend. Hieronder worden de belangrijkste aspecten beschreven.

Aangezien de verkeersstromen A15 West ↔ Thomassentunnel parallel aan elkaar lopen, vormen zij samen één dwarsprofiel. Dit samengevoegde dwarsprofiel is weergegeven in Figuur 25.

Het huidige dwarsprofiel op de Harmsenbrug blijft behouden om te voorkomen dat de constructie van de brug moet worden veranderd, maar het dwarsprofiel vlak voor de brug wordt aangepast om te voldoen aan het benodigde aantal rijstroken voor het ideale ontwerp. Dit aangepaste dwarsprofiel is weergegeven in Figuur 26.



Figuur 25: Schematische weergave dwarsprofiel van de A15 met een totale breedte van 31,4 meter



Figuur 26: Schematische weergave dwarsprofiel N57 vlak na de Harmsenbrug (noordzijde) met een totale breedte van 25,4 meter

7.5 Maatregelen voor het realiseren van het ideale ontwerp

Hoewel dit ontwerp zich uitsluitend richt op de verkennende fasen van het Kader Wegontwerpproces van Rijkswaterstaat, is het verstandig om nu al te onderzoeken wat de mogelijkheden zijn om het ideale ontwerp in de bestaande situatie te realiseren. De implementatie van het nieuwe ontwerp zou immers zodanige knelpunten kunnen veroorzaken dat aanpassingen aan het ontwerp noodzakelijk worden.

Hieronder worden drie mogelijke maatregelen voorgesteld om problemen bij de implementatie te reduceren. Deze analyse is echter niet uitputtend en dient uitsluitend als verkenning:

1. In het ideale ontwerp komt de A15 meer naar het noorden te liggen, zodat de verbindingswegen van en naar de N57 niet boven het Hartelkanaal uitkomen. Hierdoor kan het verkeer tijdens de bouw van de nieuwe snelweg deels gebruik blijven maken van de bestaande A15. Hoewel dit waarschijnlijk niet voor het gehele traject mogelijk is, met name nabij de tunnelmonden van de Thomassentunnel, vormt deze maatregel een eerste aanzet tot het beperken van de doorstromingsproblemen.
2. In het huidige ontwerp van de Harmsenknoop bevinden de verbindingswegen zich voornamelijk aan de westkant van de Harmsenbrug, terwijl in het ideale ontwerp deze juist aan de oostzijde worden gerealiseerd. Hierdoor is het verkeer ook tijdens de bouw in staat geruime tijd van de bestaande verbindingswegen gebruik te blijven maken.
3. De bestaande verbindingsweg van de Thomassentunnel naar de N57 heeft twee rijstroken. Tijdens de bouw zou het mogelijk zijn om tijdelijk één rijstrook beschikbaar te stellen voor het verkeer in tegengestelde richting, zodat eerst de nieuwe verbindingsweg N57 → Thomassentunnel kan worden gerealiseerd. Wanneer deze nieuwe verbindingsweg, eveneens met twee rijstroken, gereed is, kan deze tijdelijk worden gebruikt voor het verkeer in de tegenovergestelde richting. Dit maakt de aanleg van de nieuwe verbindingsweg van de Thomassentunnel → N57 mogelijk.

Hoewel deze drie maatregelen een eerste indicatie geven van mogelijke oplossingen tijdens de uitvoeringsfase, is het aannemelijk dat de aanwezigheid van ongelijkvloerse kruisingen tot uitvoeringsproblemen kan leiden. Het is daarom van belang dat hier tijdens volgende ontwerpfasen (detaillering en realisatie) nadrukkelijk aandacht aan wordt besteed. Hierbij wordt aangeraden om te kijken naar:

- Mogelijke tijdelijke rijbanen en omleidingen;
- Mogelijkheden om het verkeer over smalle rijstroken langs de bouwzone te laten rijden;

- De inzet van dynamisch verkeersmanagement met behulp van dynamische verkeersborden en de matrixsignaleringsystemen;
- De mogelijkheden om de constructies van verbindingswegen vooraf met prefab materialen te bouwen, zodat het huidige ontwerp slechts korte tijd hoeft te worden afgesloten.

7.6 Overzicht ontwerpkeuzes Elementair Ontwerp

In deze paragraaf wordt een overzicht gegeven van de ontwerpkeuzes die in het Elementair Ontwerp bij het opstellen van de ideale ontwerpvariant zijn gemaakt.

1. Op basis van de ontwerpsnelheden en Tabel 5.12 uit de Richtlijnen Ontwerp Autosnelwegen (ROA) worden de boogstralen en bijbehorende verkanting van de verbindingswegen gekozen.
 - Hierbij is vanwege de beperkte beschikbare ruimte steeds de minimaal toegestane boogstraal gekozen.
2. De lengte van de overgangsbogen worden berekend aan de hand van de boogstraal en clothoïdeparameter A.
3. Op basis van de viltstiftenschets is bepaald waar ongelijkvloerse kruisingen moeten komen, zodat op deze locaties de benodigde hoogte van de verbindingswegen kan worden berekend.
 - De benodigde hoogte is afhankelijk van de benodigde vrije ruimte en constructiehoogte.
 - De vrije ruimte voor voertuigen is 4,60 meter (ROA, 2019), terwijl een trein 6,75 meter vrije ruimte (hoogte) nodig heeft (ProRail, 2015).
4. De hellingspercentages worden bepaald met de formule: $i = \frac{h}{L} * 100\%$, waarbij de benodigde hoogtes bij de ongelijkvloerse kruisingen en de begin- en eindhoogtes van de verbindingswegen als uitgangspunten worden genomen.
 - Hierbij moeten de maximaal toegestane hellingen en lengtes van deze hellingen, zoals beschreven in Tabel 5.16 van de ROA, in acht worden genomen.
5. De lengtes van in- en uitvoegstroken zijn bepaald aan de hand de bijbehorende acceleratie- en deceleratielengtes.
 - Hierbij wordt gekeken naar de ontwerpsnelheid van de doorgaande en toeleidende of afbuigende rijbaan.
6. Een controle van de gehanteerde turbulentieafstanden tussen de discontinuïteiten van het ideaal ontwerp wordt gedaan door deze te vergelijken met de minimaal benodigde turbulentieafstanden volgens Tabel 6.6 van de ROA.
7. Het dwarsprofiel van de verbindingswegen wordt opgesteld op basis van de verplichte onderdelen en afmetingen volgens paragraaf 5.4 van de ROA.
 - Hierbij wordt de benodigde bochtverbreding berekend door te kijken naar het verschil tussen de boogstraal die de voor- en achterwielen van een voertuig doorlopen in een bocht.
 - Het dwarsprofiel van de tegengestelde richtingen van de A15 wordt samengevoegd, waarbij een middenberm met een voertuigkering wordt toegepast.

Met deze ontwerpkeuzes voldoet het Elementair Ontwerp (EO) van de ideale ontwerpvariant aan het programma van eisen en zijn de harde randvoorwaarden in acht genomen. Daarnaast houdt het EO rekening met het rijstrokenschema en de viltstiftenschets uit het Functioneel Ontwerp, zodat het aantal rijstroken en de ligging van discontinuïteiten overeenkomt. Het uitwerken van het horizontaal en verticaal alignment is gedaan aan de hand van de gegevens van de ROA, zodat het ideaal ontwerp richtlijnconform is opgesteld. Alleen vijf van de zestien gehanteerde turbulentieafstanden zijn kleiner dan de minimaal vereiste afstanden volgens de ROA. De eerste gevolgen hiervan op het gebied van doorstroming en verkeersveiligheid worden in de microsimulatie geanalyseerd.

8. Knelpuntenanalyse

In de knelpuntenanalyse wordt het Elementair Ontwerp (EO) van de ideale ontwerpvariant geconfronteerd met de bespreekbare randvoorwaarden en wordt gekeken of het ontwerp conflicteert met aanvullende ruimtelijke beperkingen en omgevingsfactoren. Hiervoor wordt allereerst gecontroleerd of de ideale ontwerpvariant voldoet aan het programma van eisen en of het alle harde randvoorwaarden van paragraaf 5.1.1 in acht neemt.

De ideale ontwerpvariant accommodeert de tien gegeven verkeersstromen in het programma van eisen en voldoet daarnaast aan de Richtlijnen Ontwerp Autosnelwegen (ROA) met uitzondering van vijf van de zestien minimaal benodigde turbulentieafstanden. Vanwege de scheiding van rijbanen en het wegnemen van conflicten met kruisend verkeer voldoet het ideale ontwerp ook aan de eisen ten aanzien van de wegcategorie. Hoewel de verkeersveiligheids- en doorstromingsanalyse in de volgende hoofdstukken met microsimulaties worden gedaan, kan worden verwacht dat deze ideale ontwerpvariant veiliger en efficiënter voor de doorstroming is, omdat het geen gelijkvloerse kruisingen bevat. Daarnaast zorgt het ideale ontwerp voor hogere ontwerpssnelheden op de meeste verbindingswegen vergeleken met het huidige ontwerp.

Doordat het ideale ontwerp aansluit op de huidige liggingen van de Harmsenbrug, Calandbrug en Thomassentunnel en omdat het ideale ontwerp geen wegen boven de opslagterminals of het extra overspanningen over het Hartelkanaal creëert, voldoet het ideale ontwerp aan de harde randvoorwaarden.

Hoewel de horizontale ligging van de Havenspoorlijn wordt behouden bij de ideale ontwerpvariant, moet de spoorlijn wel van +10,60 naar +9,45 meter worden verlaagd ter hoogte van de ongelijkvloerse kruising met de verbindingsweg Thomassentunnel → N57. Dit betekent dat het ideale ontwerp niet voldoet aan de bespreekbare randvoorwaarde over het behouden van de verticale ligging van de Havenspoorlijn.

Verder heeft het ideale ontwerp geen aansluiting tussen de Moezelweg en de Harmsenknoop, waardoor niet aan de derde bespreekbare randvoorwaarde van paragraaf 5.1.2 wordt voldaan. Het weglaten van de rotonde met de Moezelweg maakt het mogelijk dat de ideale ontwerpvariant een directe verbindingsweg met een ontwerpssnelheid van 70 km/h voor de verbindingswegen N57 ↔ Thomassentunnel kan realiseren. Om toch aan de bespreekbare randvoorwaarden te voldoen, wordt in deze knelpuntenanalyse gekeken welke ontwerpconcessies mogelijk zijn om de ideale ontwerpvariant om te zetten naar een realistische ontwerpvariant, die naast de harde randvoorwaarden ook aan de bespreekbare randvoorwaarden voldoet.

8.1 Knelpunten van het ideale ontwerp

Het ideale ontwerp heeft de volgende knelpunten met de omgeving en met de bespreekbare randvoorwaarden van paragraaf 5.1.2:

1. De verticale ligging van de Havenspoorlijn blijft niet behouden op de huidige locatie.
2. De aansluiting tussen de Moezelweg en de Harmsenknoop is weggehaald.

Daarnaast kruisen drie wegvakken elkaar ongelijkvloers in het ideale ontwerp bij ongelijkvloerse kruising 1. Dit zorgt voor hoge kosten bij het aanleggen van het ideale ontwerp. Om deze kosten te reduceren, wordt de constructie met drie verbindingswegen boven elkaar als derde knelpunt gezien:

3. De kosten voor de aanleg van ongelijkvloerse kruising 1 met drie verbindingswegen boven elkaar zijn hoog.

In de volgende paragraaf worden mogelijke oplosrichtingen voor deze drie knelpunten geanalyseerd.

8.2 Oplosrichtingen van de knelpunten

Om tot een realistische ontwerpvariant te komen, wordt gekeken naar de ontwerpconcessies die mogelijk zijn aan het ideale ontwerp, zodat de drie knelpunten uit de vorige paragraaf kunnen worden opgelost. Hieronder worden de oplosrichtingen van de knelpunten beschreven.

Knelpunt 1: Behoud van verticale ligging van Havenspoorlijn

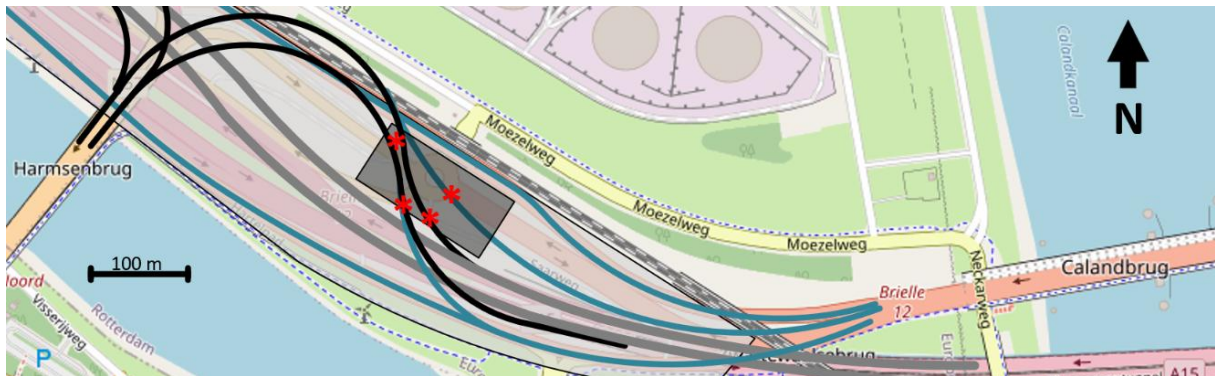
Om te voorkomen dat de verticale ligging van de Havenspoorlijn veranderd moet worden voor het realistische ontwerp van de Harmsenknoop, mogen de verbindingswegen niet boven de Havenspoorlijn worden gerealiseerd. Dit betekent dat de boogstraal van de verbindingsweg Thomassentunnel → N57 verkleind dient te worden. Hierdoor zal ook de boogstraal van de verbindingsweg N57 → Thomassentunnel kleiner gerealiseerd moeten worden.

In de ideale ontwerpvariant zijn de verbindingswegen N57 ↔ Thomassentunnel ontworpen met een boogstraal van 160 meter en een ontwerpsnelheid van 70 km/h. Volgens Tabel 5.12 van de ROA is een boogstraal van 160 meter de kleinst mogelijke boogstraal bij een ontwerpsnelheid van 70 km/h (ROA, 2019). Dit betekent dat de ontwerpsnelheid voor de realistische ontwerpvariant verlaagd moet worden naar 50 km/h om een kleinere boogstraal mogelijk te maken. Aan de hand van Tabel 5.12 van de ROA is zodoende gekozen voor een boogstraal van 80 meter met een verkanting van 6,5%.

Hoewel het verkleinen van deze boogstraal en het verlagen van de ontwerpsnelheid concessies aan het ideale ontwerp zijn, is het op deze manier mogelijk om in de realistische ontwerpvariant een directere verbinding met een grotere boogstraal tussen de N57 en Thomassentunnel te realiseren dan in het huidige ontwerp.

Knelpunt 2: Behoud van aansluiting tussen Moezelweg en Harmsenknoop

Om de aansluiting tussen de Moezelweg en de Harmsenknoop te behouden, is het noodzakelijk om hiervoor ruimte te reserveren tussen de Thomassentunnel/Calandbrug en de westkant van de Harmsenbrug. In Figuur 27 wordt met een zwarte rechthoek het gebied van deze ruimtereservering weergegeven, waarbij rode sterren aangeven waar deze ruimtereservering conflicteert met het ontwerp.



Figuur 27: Ruimtereservering voor behoud van de aansluiting tussen Moezelweg en Harmsenknoop (zwarte rechthoek) en bijbehorende knelpunten met het ideale ontwerp (rode sterren)

Figuur 27 laat zien dat de ruimtereservering voor de aansluiting met de Moezelweg conflicteert met de verbindingswegen: Thomassentunnel → N57, Calandbrug → N57, N57 → Thomassentunnel en N57 → Calandbrug. Dit betekent dat in ieder geval de verbindingswegen N57 ↔ Thomassentunnel niet meer ten westen van de Harmsenbrug zouden kunnen worden gerealiseerd. Dit houdt in dat deze verbindingen in het gebied aan de westkant van de Harmsenbrug gerealiseerd moeten worden. Vanwege de beperkte breedte van het gebied aan de westkant van de Harmsenbrug, kunnen deze verbindingswegen alleen op dezelfde manier als in het huidige ontwerp gerealiseerd worden.

Voor het realistische ontwerp kan dus alleen een andere variant dan het huidige ontwerp worden gecreëerd indien de aansluiting met de Moezelweg wordt weggelaten. Dit zorgt namelijk voor extra

ruimte aan de oostkant van de Harmsenbrug, zodat hier de verbindingswegen Thomassentunnel ↔ N57 kunnen worden gerealiseerd. Door de aansluiting tussen de Harmsenknoop en de Moezelweg te verwijderen, moet het bestemmingsverkeer van de Moezelweg omrijden. De routes voor het omrijdende verkeer worden in Bijlage 12 in kaart gebracht. Het omrijdende verkeer maakt het mogelijk dat de realistische ontwerpvariant een (semi)directe verbinding tussen de N57 en de Thomassentunnel heeft en dat het realistische ontwerp zonder gelijkvloerse kruisingen kan worden gerealiseerd.

Knelpunt 3: Ongelijkvloerse kruising 1 aanpassen naar hoogstens twee verbindingswegen boven elkaar

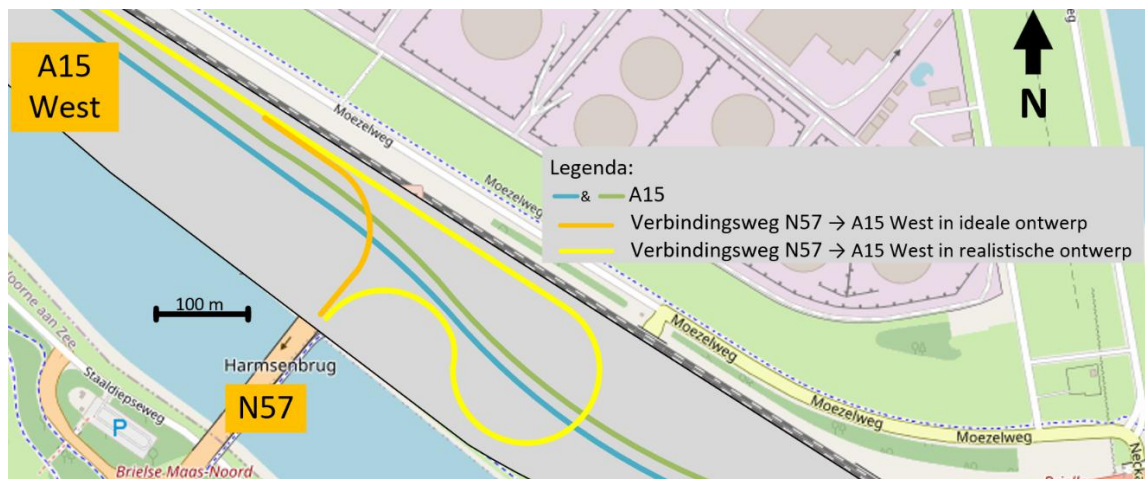
In de ideale ontwerpvariant worden bij ongelijkvloerse kruising 1 drie verbindingswegen boven elkaar gerealiseerd: N57 → Thomassentunnel, Calandbrug → A15 West en A15 West ↔ Thomassentunnel. Een constructie met drie verbindingswegen boven elkaar brengt hoge aanlegkosten met zich mee. Om ongelijkvloerse kruising 1 in de realistische variant te vereenvoudigen tot een kruising waar maximaal twee verbindingswegen elkaar bovenlangs kruisen, moet één van de drie verbindingswegen worden verlegd. Hieronder wordt onderzocht welke van deze drie verbindingswegen verlegd moet worden in de realistische variant.

De A15 vormt de hoofdverbinding van de Harmsenknoop en kan niet ver genoeg worden verlegd om ongelijkvloerse kruising 1 te vermijden. De verbindingsweg N57 → Thomassentunnel wordt in de realistische ontwerpvariant met een kleinere boogstraal gerealiseerd om niet boven de Havenspoorlijn uit te komen. Ten opzichte van de ideale variant is deze verbindingsweg daardoor korter, waardoor deze verbindingsweg in de realistische variant onvoldoende lengte zou hebben om de vereiste hoogte boven de twee andere verbindingswegen te bereiken. Bovendien kan deze verbindingsweg in de realistische variant niet worden verlegd, omdat het realiseren aan de oostkant van de Harmsenbrug de enige manier is om af te wijken van het huidige ontwerp.

Daarom wordt in de realistische variant de verbindingsweg N57 → A15 West verlegd. Deze buigt zodoende eerst af naar de oostkant van de Harmsenbrug en kruist de A15 bovenlangs voor de Thomassentunnel. Dit maakt het mogelijk dat deze verbinding op dezelfde hoogte als de verbindingsweg Calandbrug → A15 West kan worden gelegd ter hoogte van ongelijkvloerse kruising 1.

Volgens de berekening van paragraaf 6.1 heeft een indirecte verbinding met een ontwerpsnelheid van 50 km/h voldoende capaciteit voor het verkeer op de verbindingsweg N57 → A15 West. Dit betekent dat volgens Tabel 5.12 van de ROA een boogstraal van 80 meter toereikend is. Figuur 28 geeft de nieuwe ligging van de verbindingsweg N57 → A15 West in de realistische ontwerpvariant weer.

Met deze drie gevonden knelpunten tussen het ideale ontwerp en aanvullende ruimtelijke beperkingen wordt aangenomen dat de belangrijkste knelpunten zijn gevonden. In het volgende hoofdstuk wordt de realistische ontwerpvariant uitgewerkt.



Figuur 28: Ligging van de verbindingsweg N57 → A15 West in de ideale en realistische ontwerpvariant

9. Realistische variant

In dit hoofdstuk worden twee ontwerpconcessies aan het ideale ontwerp uitgewerkt, zodat een realistische ontwerpvariant kan worden opgesteld die de knelpunten uit de knelpuntenanalyse (Hoofdstuk 8) vermijdt. Dit betekent dat het ideale ontwerp en bijbehorende ontwerpkeuzes, zoals beschreven in Hoofdstuk 6 en 7, de basis vormen voor de realistische ontwerpvariant.

Enkel de twee benodigde ontwerpconcessies worden uitgewerkt, zodat de (verticale) ligging van de Havenspoorlijn wordt behouden en zodat een ongelijkvloerse kruising met drie verbindingswegen boven elkaar wordt voorkomen. De realistische variant heeft zodoende de volgende twee ontwerpconcessies ten opzichte van het ideale ontwerp:

1. De verbindingswegen N57 ↔ Thomassentunnel worden verlegd om te voorkomen dat deze boven de Havenspoorlijn uitkomen.
 - a. De nieuwe boogstraal wordt 80 meter.
 - b. De nieuwe ontwerpsnelheid wordt 50 km/h.
2. De verbindingsweg N57 → A15 West wordt verlegd om te voorkomen dat drie verbindingswegen boven elkaar worden gerealiseerd bij ongelijkvloerse kruising 1.
 - a. De verbindingsweg buigt eerst naar de oostkant van de Harmsenbrug af.
 - b. Vervolgens kruist de verbindingsweg de A15 bovenlangs voor de Thomassentunnel.
 - c. De verbindingsweg wordt op gelijke hoogte als de verbindingsweg Calandbrug → A15 West gelegd bij deze invoeging naast de Havenspoorlijn.

Door deze ontwerpconcessies in het ideale ontwerp te verwerken, ontstaat een realistische ontwerpvariant die beter aansluit bij de ruimtelijke context. De volgende paragrafen gaan in op het horizontaal en verticaal alignement van de realistische ontwerpvariant. Daarnaast wordt gekeken naar de lengtes van in- en uitvoegstroken en worden de gehanteerde turbulentieafstanden gecontroleerd. Tot slot wordt ingegaan op het dwarsprofiel van de wegen en de gemaakte ontwerpkeuzes.

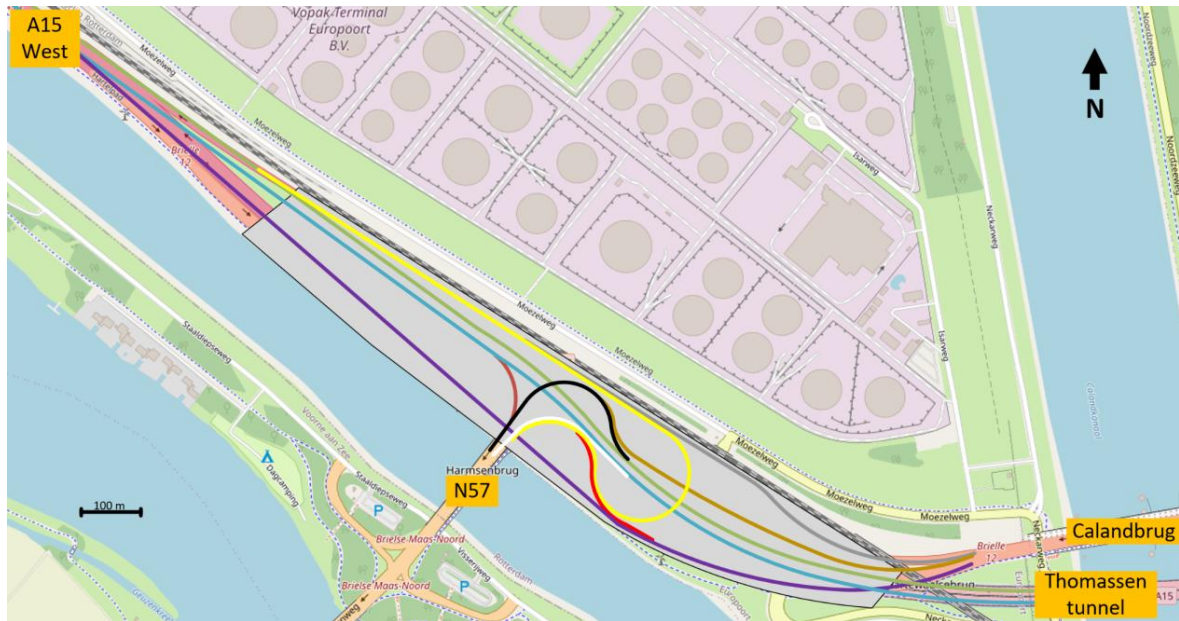
9.1 Horizontaal alignement

Ten opzichte van het horizontale alignement van de ideale ontwerpvariant wordt de boogstraal van de verbindingswegen N57 ↔ Thomassentunnel aangepast naar 80 meter. Dit heeft als gevolg dat ook de boogstralen van de verbindingswegen N57 ↔ Calandbrug moeten worden aangepast, omdat deze halverwege de boog tussen de N57 en Thomassentunnel worden aangesloten.

De tweede ontwerpconcessie die in de realistische ontwerpvariant wordt doorgevoerd is het verleggen van de verbindingsweg N57 → A15 West, waardoor deze eerst richting het oosten afbuigt, voordat met een boogstraal van 80 meter 180 graden gedraaid wordt in de richting van de A15 West. Om deze bocht van 180 graden mogelijk te maken met een boogstraal van 80 meter, moet de verbindingsweg A15 West → Calandbrug een paar meter naar het Hartelkanaal worden opgeschoven.

In Bijlage 19 wordt in detail beschreven hoe het horizontale alignement van de realistische ontwerpvariant is uitgewerkt.

Deze veranderingen aan het ideale ontwerp zorgen voor een nieuwe ontwerpvariant: de realistische variant. De viltstiftenschets van de realistische ontwerpvariant is weergegeven in Figuur 29. Tabel 8 geeft een overzicht van de ontwerpparameters en gekozen boogstralen van de verbindingswegen in het realistische ontwerp.



Figuur 29: Viltstiftschets realistische ontwerpvariant met verschillende kleuren voor de tien verkeersstromen

Tabel 8: Realistische ontwerp: overzicht van de ontwerpparameters en de gekozen boogstraal (ROA, 2019)

Verkeersstroom	Kleur	Ontwerpsnelheid	Verkanting	Boogstraal
A15 West → Calandbrug	Paars	90 km/h	2,5 %	675 m
A15 West → Thomassentunnel	Lichtblauw	120 km/h	5%	750 m
A15 West → N57	Roodbruin	50 km/h	6,5%	80 m
Calandbrug → A15 West	Grijs	90 km/h	6%	330 m
Calandbrug → N57	Goud	50 km/h	2,5%	400 m
N57 → Calandbrug	Rood	50 km/h	6,5%	80 m
N57 → Thomassentunnel	Wit	50 km/h	6,5%	80 m
N57 → A15 West	Geel	50 km/h	6,5%	80 m
Thomassentunnel → A15 West	Lichtgroen	120 km/h	5%	750 m
Thomassentunnel → N57	Zwart	50 km/h	6,5%	80 m

Overgangsbogen

Doordat een aantal boogstralen zijn gewijzigd ten opzichte van de ideale ontwerpvariant, zullen voor deze bogen in de realistische ontwerpvariant nieuwe lengtes van de overgangsbogen moeten worden berekend. Dit gebeurt op dezelfde wijze als bij het horizontale alignement van de ideale ontwerpvariant en de berekening is weergegeven in Bijlage 19.

Ligging van discontinuïteiten

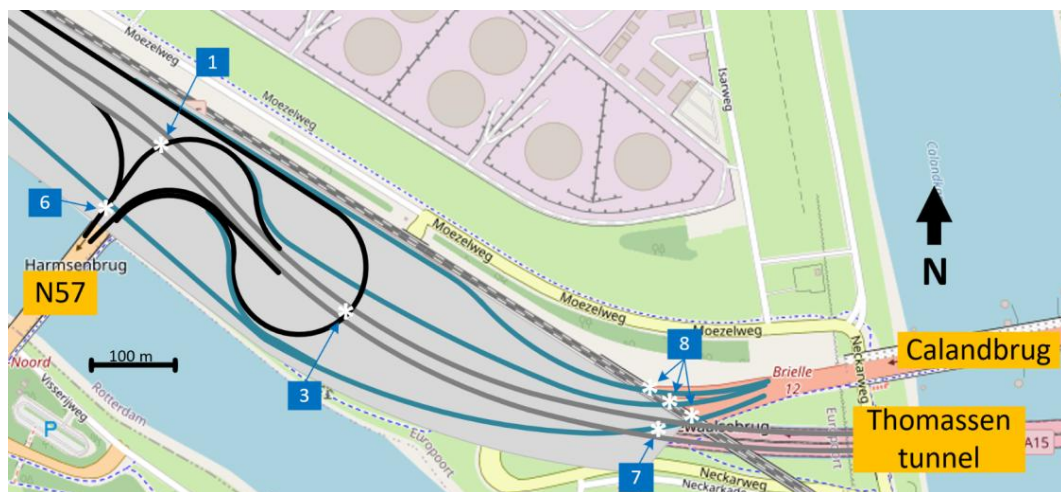
Ten opzichte van het ideale ontwerp zijn bij de realistische ontwerpvariant de discontinuïteiten 3-u en 5-u gewijzigd door het verleggen van de verbindingsweg N57 → A15 West. Daarnaast is discontinuïteit 5-i richting het oosten verlegd in de realistische variant om beter aan te sluiten op de verlegde verbindingsweg N57 → A15 West. De locatie van alle discontinuïteiten en bijbehorende labels in de realistische ontwerpvariant zijn weergegeven in Bijlage 19.

Discontinuïteit 5-u wordt in de realistische variant een toevoeging van een extra rijstrook aan de rechterkant, zodat het wegvak richting discontinuïteit 3-u drie rijstroken bevat. Daarnaast moet discontinuïteit 3-u worden aangepast in de realistische variant, zodat alle drie de verbindingswegen N57 → Thomassentunnel, N57 → A15 West en N57 → Calandbrug na discontinuïteit 3-u als gescheiden verbindingswegen verdergaan. In Bijlage 19 worden principeschetsen van 3-u en 5-u gegeven. De overige discontinuïteiten in het realistische ontwerp blijven gelijk aan die van het ideale ontwerp en deze worden weergegeven in Bijlage 11.

9.2 Verticaal alignement

Het verticaal alignement van de ideale ontwerpvariant is de basis voor het verticale alignement van de realistische ontwerpvariant. Vanwege de verlegging van de verbindingsweg N57 → A15 West en het verkleinen van de boogstralen van de verbindingswegen N57 ↔ Thomassentunnel zijn de ongelijkvloerse kruisingen 2, 4, en 5 van het ideale ontwerp opgeheven. Daarnaast kruisen enkel de A15 en de verbindingsweg Thomassentunnel → N57 elkaar bij ongelijkvloerse kruising 1.

Verder wordt ongelijkvloerse kruising 3 verlegd en is dit een ongelijkvloerse kruising tussen de A15 en de verbindingsweg N57 → A15 West in plaats van tussen de A15 en de verbindingsweg N57 → Thomassentunnel/Calandbrug. Ongelijkvloerse kruisingen 6, 7, en 8 blijven gelijk aan die in het ideale ontwerp. Figuur 30 geeft een overzicht van de ongelijkvloerse kruisingen in de realistische ontwerpvariant. De ongelijkvloerse kruisingen die in het realistische ontwerp worden aangepast worden in Bijlage 19 nader besproken.



Figuur 30: Overzicht ligging van de ongelijkvloerse kruisingen van het realistische ontwerp

Hellingspercentages

Nu de hoogtes van de begin- en eindpunten van de verbindingswegen en bij de ongelijkvloerse kruisingen bekend zijn, is het mogelijk om de bijbehorende hellingspercentages van de wegvakken op de Harmsenknoop te bepalen. Dit gebeurt op dezelfde manier als in paragraaf 7.2 en de berekening van de hellingspercentages wordt weergegeven in Bijlage 19. Uit Tabel 53 in Bijlage 19 volgt dat het realistische ontwerp geen wegvakken heeft met een groter hellingspercentage dan volgens Tabel 5.16 van de ROA is toegestaan. Dit betekent dat het verticale alignement van de realistische ontwerpvariant voldoet aan de richtlijnen.

9.3 Lengtes in- en uitvoegstroken en controle van turbulentieafstanden

Nu de hellingen van de wegvakken van de realistische ontwerpvariant van de Harmsenknoop bekend zijn, is het mogelijk om de benodigde lengte van de in- en uitvoegstroken te bepalen. Daarnaast wordt in deze paragraaf gekeken of de realistische variant voldoet aan de minimale turbulentieafstanden volgens Tabel 6.6 van de ROA.

Lengtes in- en uitvoegstroken

De lengtes van de in- en uitvoegstroken zijn afhankelijk van de benodigde acceleratie- en deceleratielengtes. In de realistische ontwerpvariant blijven de meeste in- en uitvoegstroken gelijk aan die van de ideale ontwerpvariant, zoals beschreven in paragraaf 7.3 en Bijlage 16. Enkel discontinuïteiten 2-i, 3-u en 5-u moeten nader worden bekeken om te controleren of de lengtes van deze in- of uitvoegstroken veranderd moeten worden.

Bij invoeging 2-i zijn hebben de toeleidende en doorgaande rijbanen beide een ontwerpsnelheid van 50 km/h om door de bocht met een boogstraal van 80 meter te rijden. Dit betekent dat het verkeer niet extra hoeft te accelereren om op dezelfde snelheid te komen. De lengte van invoegstrook 2-i wordt vanwege de beperkte ruimte 150 meter lang gemaakt.

Bij uitvoeging 3-u verandert de snelheid tussen de doorgaande en afbuigende rijbaan niet, omdat beide 50 km/h zijn. Vanwege de beperkte ruimte in deze S-boog, wordt de lengte van de uitvoegstrook 150 meter lang.

Discontinuïteit 5-u is in de realistische ontwerpvariant een toevoeging van een extra rijstrook geworden. Deze extra rijstrook wordt direct na de Harmsenbrug gerealiseerd, zodat het verkeer voldoende ruimte heeft om van rijbaan te wisselen.

Controle van de turbulentieafstanden

Ook in de realistische ontwerpvariant zorgt de beperkte ruimte voor een dichte opeenvolging van discontinuïteiten. Ten opzichte van het ideaal ontwerp zijn meerdere discontinuïteiten verlegd, waardoor opnieuw de turbulentieafstanden moeten worden gecontroleerd. Deze controle is weergegeven in Tabel 54 van Bijlage 19. Uit deze tabel volgt dat vier van de zestien turbulentieafstanden niet voldoen aan de minimaal benodigde afstand volgens Tabel 6.6 van de ROA. Hiervan komen twee van de vier overeen met die uit het ideaal ontwerp, namelijk de afstanden tussen discontinuïteiten 5-u en 3-u op de verbindingsweg N57 → Thomassentunnel en die tussen 2-i en 4-i op de route Thomassentunnel → N57.

Daarentegen zijn in de realistische variant de afstanden tussen 1-u en 2-i op de verbindingsweg Thomassentunnel → N57 en tussen 3-u en 1-i op de verbindingsweg N57 → Thomassentunnel niet toereikend volgens de ROA. Dit komt in beide gevallen door de ontwerpconcessie waarbij de boogstraal van deze verbindingswegen is verkleind om niet boven de Havenspoorlijn uit te komen.

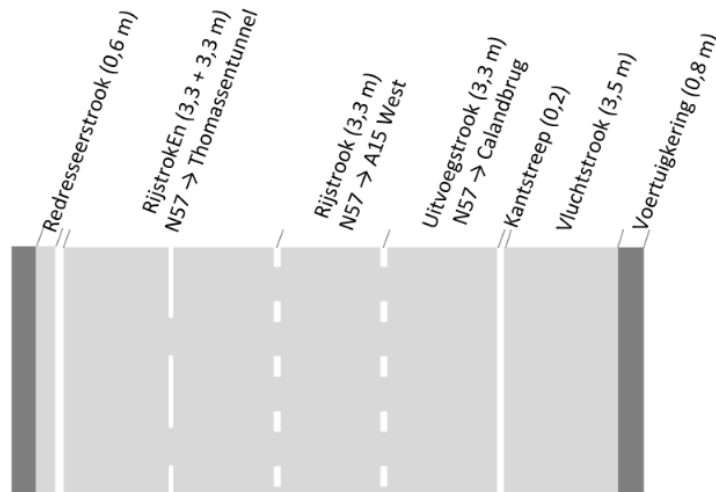
In de realistische variant zijn echter wel de afstanden tussen 1-i en de ingang van de Thomassentunnel, 1-u en de uitgang van de Thomassentunnel en de afstand tussen 5-i en 3-i op de verbindingsweg A15 West → Calandbrug toereikend, terwijl dit in de ideale variant niet het geval is. Dit komt door de ontwerpconcessie waarbij de verbindingsweg N57 → A15 West is verlegd.

In het microsimulatie onderzoek (Hoofdstuk 10 en 11) worden de gevolgen van deze ontwerpconcessies in kaart gebracht en wordt onderzocht of de kleinere turbulentieafstanden leiden tot doorstromings- en verkeersveiligheidsproblemen.

9.4 Dwarsprofiel

Hoewel de onderdelen van het dwarsprofiel van de verbindingswegen in de realistische ontwerpvariant hetzelfde blijven als in het ideale ontwerp, moet de benodigde bochtverbreding opnieuw worden berekend voor de bogen met een aangepaste boogstraal. De resultaten van deze berekening zijn gepresenteerd in Bijlage 19. In deze bijlage worden ook breedtes van de dwarsprofielen bepaald op basis van verplichte en optionele onderdelen uit Tabel 49 in Bijlage 18.

Doordat de verbindingsweg N57 → A15 West in het realistische ontwerp eerst afbuigt naar het oosten, loopt deze verbindingsweg eerst tussen de verbindingswegen N57 → Thomassentunnel en N57 → Calandbrug. Dit betekent dat het dwarsprofiel vanaf de Harmsenbrug tot discontinuïteit 3-u nader moet worden bekeken. Dit dwarsprofiel is weergegeven in Figuur 31 en bevat aan de linkerkant twee rijstroken voor de verbinding N57 → Thomassentunnel, vervolgens één doorgaande rijstrook voor de verbinding N57 → A15 West en aan de rechterkant zit de uitvoegstrook voor de verbinding N57 → Calandbrug. Dit zorgt voor een totale breedte van 19,70 meter.



Figuur 31: Schematische weergave van de weg tussen de Harmsenbrug en discontinuïteit 3-u met een totale breedte van 19,7 meter

9.5 Overzicht ontwerpkeuze realistische ontwerpvariant

De realistische ontwerpvariant is opgesteld om, naast de ideale ontwerpvariant, een alternatief te ontwikkelen waarin rekening wordt gehouden met de knelpunten uit de knelpuntenanalyse (Hoofdstuk 8). Dit betekent dat in dit onderzoek drie varianten worden beschouwd: het huidige ontwerp van de Harmsenknoop, het ideale ontwerp en het realistische ontwerp.

Ten opzichte van de ideale ontwerpvariant zijn in het realistische ontwerp concessies gedaan om de volgende knelpunten te vermijden:

- De verbindingswegen N57 ↔ Thomassentunnel worden verlegd om te voorkomen dat deze boven de Havenspoorlijn uitkomen.
- De verbindingsweg N57 → A15 West wordt verlegd om te voorkomen dat drie verbindingswegen boven elkaar worden gerealiseerd bij ongelijkvloerse kruising 1.

Daarnaast is in de realistische ontwerpvariant, net als in de ideale variant, de aansluiting tussen de Harmsenknoop en de Moezelweg verwijderd, zodat deze variant uitsluitend uit ongelijkvloerse kruisingen bestaat en om te voorkomen dat het realistische ontwerp te veel overeenkomt met het huidige ontwerp van de Harmsenknoop.

In deze paragraaf wordt een overzicht gegeven van de ontwerpkeuzes die zijn gemaakt bij het uitwerken van de ontwerpconcessies in de realistische ontwerpvariant. Hierbij is dezelfde aanpak als bij de ideale variant gevolgd, maar zijn bepaalde aspecten opnieuw berekend om aan de genoemde ontwerpconcessies te voldoen.

1. Om niet boven de Havenspoorlijn uit te komen, wordt de boogstraal van de verbindingsweg Thomassentunnel → N57 (en daardoor ook die van N57 → Thomassentunnel) verkleind naar 80 meter. De nieuwe ontwerpsnelheid wordt zodoende 50 km/h.
 - Dit is bepaald op basis Tabel 5.12 uit de Richtlijnen Ontwerp Autosnelwegen (ROA).
2. De verbindingsweg N57 → A15 West wordt verlegd, zodat een ongelijkvloerse kruising met drie verbindingswegen boven elkaar wordt voorkomen
 - De bijbehorende boogstraal, die past in de beschikbare ruimte is 80 meter. Dit levert een ontwerpsnelheid van 50 km/h op volgens Tabel 5.12 uit de ROA.
 - De verbindingsweg A15 West → Calandbrug wordt een paar meter naar het Hartelkanaal opgeschoven, zodat de boog beter past in de ruimtelijke context.

3. De lengtes van de overgangsbogen, die ten opzichte van de ideale ontwerpvariant zijn veranderd, worden berekend aan de hand van de aangepaste boogstraal in de realistische variant en clothoïdeparameter A.
4. Het type van de discontinuïteiten, die ten opzichte van de ideale ontwerpvariant zijn veranderd, wordt bepaald op basis van het aantal doorgaande rijstroken en het aantal in- of uitvoegende, samenkomende of splitsende rijstroken.
5. Op basis van de viltstiftenschets van de realistische variant wordt gekeken of de ligging en het aantal van ongelijkvloerse kruisingen zijn veranderd ten opzichte van het ideale ontwerp.
 - Bij de veranderde kruisingen wordt opnieuw de hoogte van de verbindingswegen bepaald.
6. De hellingspercentages worden bepaald met de formule: $i = \frac{h}{L} * 100\%$, waarbij de benodigde hoogtes bij de ongelijkvloerse kruisingen en de begin- en eindhoogtes van de verbindingswegen als uitgangspunten worden genomen.
 - Hierbij moeten de maximaal toegestane hellingen en lengtes van deze hellingen, zoals beschreven in Tabel 5.16 van de ROA, in acht worden genomen.
7. Een controle van de gehanteerde turbulentieafstanden tussen de discontinuïteiten van het realistisch ontwerp wordt gedaan door deze te vergelijken met de minimaal benodigde turbulentieafstanden volgens Tabel 6.6 van de ROA.
8. Het dwarsprofiel van de verbindingswegen wordt opgesteld met de verplichte onderdelen en afmetingen volgens paragraaf 5.4 van de ROA. Hierbij wordt ook gekeken naar bochtverbreding.

Met deze ontwerpkeuzes voldoet het realistische ontwerp aan het programma van eisen en zijn de harde randvoorwaarden in acht genomen. Daarnaast zijn twee van de drie bespreekbare randvoorwaarden in de realistische ontwerpvariant meegenomen. De aansluiting tussen de Moezelweg en Harmsenknoop (bespreekbare randvoorwaarde 3) is echter niet behouden, om te voorkomen dat het realistische ontwerp te veel overeenkomt met het huidige ontwerp van de Harmsenknoop.

Door de ruimte die normaal door de rotonde bij de Moezelweg in beslag wordt genomen optimaal te benutten voor de realisatie van de verbindingsweg Thomassentunnel → N57, is het mogelijk om een realistische variant te creëren die, ondanks de ontwerpconcessies, aan de richtlijnen voldoet. Alleen twee van de vier gehanteerde turbulentieafstanden zijn kleiner dan de minimaal vereiste afstanden volgens de ROA. De eerste gevolgen hiervan op het gebied van doorstroming en verkeersveiligheid worden in de microsimulatie geanalyseerd.

In de volgende hoofdstukken worden de huidige, ideale en realistische ontwerpvariant beoordeeld op het gebied van verkeersveiligheid en doorstroming met behulp van microsimulaties.

10. Opzetten microsimulatie

De drie ontwerpvarianten (huidige ontwerp, ideale ontwerp en realistische ontwerp) worden geanalyseerd met microsimulaties om de doorstromings- en verkeersveiligheidsaspecten van de ontwerpvarianten in kaart te brengen. Hierdoor kan worden gecontroleerd of de varianten het verkeer verwerken zoals verwacht, en kunnen specifieke punten in de ontwerpen worden aangewezen die in vervolgonderzoek nader moeten worden geanalyseerd. Daarnaast maken de microsimulaties het mogelijk om de varianten kwantitatief te vergelijken, waardoor dit onderzoek een waardevolle basis vormt voor het analyseren van de belangrijkste verschillen tussen de ontwerpvarianten. Rijkswaterstaat kan deze resultaten gebruiken om een uiteindelijke keuze te maken door de in dit onderzoek gepresenteerde voor- en nadelen van de verschillende varianten tegen elkaar af te wegen.

Bovendien wordt met dit onderzoek beoordeeld of microsimulaties in staat zijn om de effecten van ontwerpconcessies op het gebied van verkeersveiligheid en doorstroming realistisch en gedetailleerd in kaart te brengen. Dit levert een bijdrage aan wetenschappelijke kennis over de inzet van microsimulaties als alternatief of aanvulling op expertbeoordelingen bij het maken van keuzes binnen het wegontwerpproces.

Voordat de drie ontwerpvarianten kunnen worden geanalyseerd met microsimulaties, wordt eerst een keuze gemaakt voor de te gebruiken microsimulatie software. Vervolgens wordt het simulatiemodel opgezet, waarbij de benodigde inputdata wordt verzameld en de gewenste outputparameters worden bepaald. In dit hoofdstuk wordt het opzetten van de microsimulatie beschreven op basis van het huidige ontwerp van de Harmsenknoop. Hierbij worden de verkeersintensiteiten uit 2023, zoals geregistreerd in het INWEVA, als uitgangspunt genomen. Tot slot wordt het aantal benodigde simulatie-runs bepaald en wordt het model gekalibreerd.

10.1 Keuze microsimulatie software

De analyse van de ontwerpvarianten met microsimulatie richt zich in dit onderzoek op de doorstromings- en verkeersveiligheidsaspecten. Voor het in kaart brengen van de doorstroming zijn meerdere microsimulatie software beschikbaar, zoals FOSIM, Vissim en Paramics.

FOSIM is specifiek ontwikkeld voor Nederlandse autosnelwegen, maar is niet geschikt voor provinciale wegen, voorrangskruispunten en rotondes (FOSIM, z.d.). Aangezien de N57 een regionale stroomweg is en geen autosnelweg, is FOSIM ongeschikt voor de analyse van het ontwerp van de Harmsenknoop.

Tussen Paramics en Vissim bestaan kleine verschillen, maar het belangrijkste onderscheid voor dit onderzoek ligt in het voertuiggedrag in bochten. In Vissim worden bochten gemodelleerd als opeenvolgende rechte wegvakken onder verschillende hoeken (van Rongen & de Jong, 2025), terwijl Paramics gebruikmaakt van gekromde wegvakken met instelbare boogstralen (Systra, z.d.). Hierdoor simuleert Paramics het rijgedrag in bochten realistischer, omdat voertuigsnelheden worden aangepast aan de straal van de bocht.

Vanwege deze eigenschappen is gekozen om de analyse van de doorstromingsaspecten in dit onderzoek met Paramics uit te voeren. Dankzij de ingebouwde kalibratiemogelijkheden kan binnen het beperkte tijdsbestek een model worden ontwikkeld dat het rijgedrag op realistische wijze benadert.

Hoewel microsimulaties volgens verkeersadviseurs van Rijkswaterstaat en Sweco niet standaard worden ingezet voor verkeersveiligheidsanalyses (van Rongen & de Jong, 2025), is in de literatuur een software geïdentificeerd die dit wel mogelijk maakt: het Surrogate Safety Assessment Model (SSAM). SSAM brengt op basis van voertuigtrajecten potentiële conflicten in kaart en berekent kwantitatieve waarden voor verschillende verkeersveiligheidsparameters (U.S. Department of Transportation, z.d.).

Omdat SSAM werkt met voertuigtrajecten als input, en deze direct kunnen worden geëxporteerd vanuit Paramics, wordt SSAM gebruikt om een eerste inzicht te verkrijgen in de verkeersveiligheidsaspecten van de ontwerpvarianten. De resultaten van beide simulaties worden vervolgens besproken en beoordeeld met verkeersveiligheidsexperts en verkeersadviseurs van Rijkswaterstaat.

10.2 Benodigde input en gewenste output

Nu de keuze voor de microsimulatie software Paramics en Surrogate Safety Assessment Model (SSAM) zijn gemaakt, kan gekeken worden naar de benodigde input en gewenste output. In Bijlage 20 worden de benodigde input voor en de werking van Paramics en SSAM nader toegelicht. Hieronder worden de belangrijkste aspecten beschreven.

Paramics

In Paramics wordt het netwerk opgebouwd aan de hand van de lengtes van de wegvakken, de boogstralen en de bijbehorende hellingen. Daarnaast kunnen de eigenschappen van elk wegvak worden aangepast, zodat het model overeenkomt met de wegcategorieën en snelheden in de realiteit.

Door met zogenoemde zones te werken, kan verkeer aan het netwerk worden toegevoegd. Hierbij is het mogelijk om de gewenste intensiteiten van de verkeersstromen in te laden in een Oorsprong-Bestemming(Destination)-matrix (OD-matrix). Waarbij zowel voor personenauto's als het vrachtverkeer aparte OD-matrix kunnen worden ingevoerd, waardoor voor elke route het juiste vrachtpercentage kan worden toegepast.

Paramics genereert de onder andere de volgende output (Systra, z.d.):

- Intensiteiten [vtg/uur] op elke link per voertuigklasse;
- Gemiddelde snelheid van elke voertuigklasse op elke link;
- Reistijden van elk OD-paar per voertuigklasse;
- Voertuigdetails, zoals XYZ-coördinaten en snelheid per tijdstap (voertuigtrajecten).

Surrogate Safety Assessment Model

Surrogate Safety Assessment Model (SSAM) heeft een bestand met de voertuigtrajecten uit een microsimulatie model, zoals Paramics, nodig als input. Dit zogenoemde trj-bestand vereist een specifieke opbouw, zodat SSAM de juiste informatie in het juiste formaat krijgt toegewezen. In Bijlage 20 worden de vereisten van het trj-bestand nader toegelicht. Daarnaast is in Python een code geschreven om het juiste formaat van het trj-bestand te creëren. Deze code is weergegeven in Bijlage 21.

Als het trj-bestand is ingevoerd, voert SSAM automatisch de conflictenanalyse uit en wordt onder andere de volgende output verkregen (U.S. Department of Transportation, z.d.):

- Het aantal voorspelde conflicten, inclusief de locatie en het type conflict;
- Waarde voor de Time-to-collision (TTC);
- Waarde voor de Post-Encroachment Time (PET) = tijd na inbreuk op in de conflictzone;
- Snelheidsverschil (DeltaS) tussen de betrokken voertuigen;
- Maximale snelheidsverschil tussen snelheden voor en na het conflict.

10.3 Huidige ontwerp in Paramics en SSAM

Het opzetten van de microsimulatie in Paramics en SSAM wordt gedaan met het huidige ontwerp van de Harmsenknoop, zodat het model gekalibreerd kan worden met behulp van de realistische gegevens van de bestaande situatie. Wanneer in Hoofdstuk 11 ook het ideale en realistische ontwerp in de microsimulatie software worden ingevoerd, kunnen dezelfde stappen worden gevolgd als die in dit

hoofdstuk zijn toegepast voor het huidige ontwerp. De specifieke stappen voor het opzetten van het model in zowel Paramics als SSAM zijn gedetailleerd beschreven in Bijlage 20. Hieronder worden enkel de belangrijkste keuzes toegelicht.

Opzetten van het microsimulatie model in Paramics

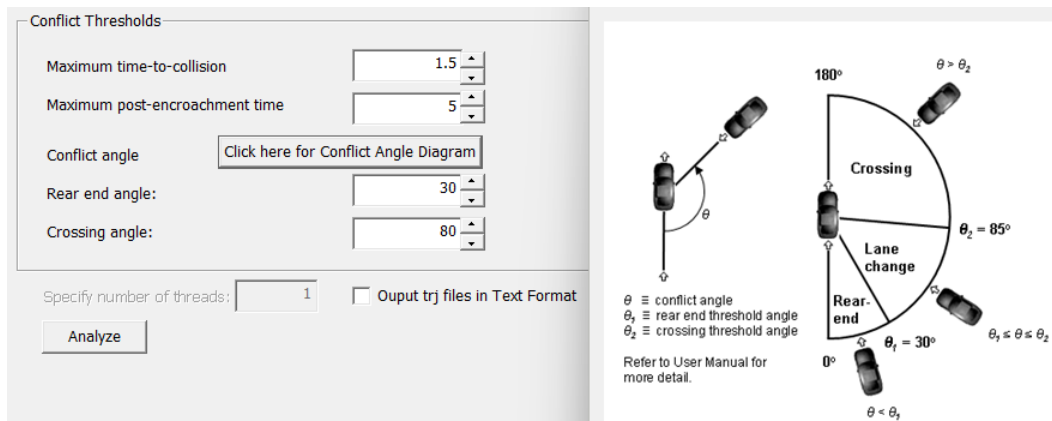
Voor de microsimulatie in Paramics is het bestaande ontwerp van de Harmsenknoop gemodelleerd op basis van een kaart van OpenStreetMap, de hoogtegegevens van Algemeen Hoogtebestand Nederland (AHN) en de afmetingen van bestaande constructies volgens technische tekeningen. Daarbij zijn wegcategorieën, snelheidslimieten en zones realistisch ingesteld op basis van het huidige ontwerp en het verkeersgedrag in het gebied.

De huidige verkeersintensiteiten zijn ingevoerd in aparte OD-matrices voor personenauto's en vrachtverkeer, waarbij zowel naar de ochtend- als avondspits wordt gekeken. Het model gebruikt een vlak spitsenprofiel met de verkeersbelasting voor het maatgevende uur in zowel de ochtend- als avondspits. Dit vlakke profiel maakt het mogelijk dat het model wordt getoetst op de zwaarste situatie.

Opzetten van het model in SSAM

Het opzetten van het model in SSAM bestaat uit twee onderdelen: het bepalen van de grenswaarden van de conflictparameters en het opstellen van een trj-bestand.

SSAM voert de conflictenanalyse automatisch uit, maar voordat de analyse wordt gestart, is het mogelijk om grenswaarden voor de conflictparameters aan te passen op het beginscherm. Daarnaast bepaalt SSAM op basis van de hoek tussen de betrokken voertuigen bij een conflict (conflict angle) het type conflict, waarbij gekozen kan worden tussen "Rear End" (= kop-staartbotsingen), "Lane Change" (= rijstrookwisselingen) en "Crossing" (= kruising) conflicten. Voor dit onderzoek zijn de standaardwaarden voor de conflictparameters en -hoeken uit SSAM gebruikt. Deze waarden zijn weergegeven in Figuur 32.



Figuur 32: Overzicht waardes van conflictparameters in SSAM en toelichting van de conflicthoeken (SSAM, 2025)

10.4 Bepaling van het aantal simulatie-runs

Microsimulaties bevatten willekeurige elementen, zoals variatie in rijgedrag, keuze van rijstroken en aankomsttijden van voertuigen. Dit leidt tot een stochastisch proces, waarbij elke simulatie-run tot andere uitkomsten kan leiden, ook als de invoer hetzelfde blijft. Een simulatie-run (kortweg 'run') is één volledige uitvoering van de microsimulatie met een bepaalde set invoergegevens, zoals intensiteiten, en specifieke willekeurige startwaarden die afhankelijk zijn van de zogenoemde random seed (Barceló, 2010). Tijdens een run simuleert het model het verkeer over een bepaalde periode, waarbij het gedrag van alle voertuigen en verkeersstromen wordt doorgerekend. Vanwege de willekeurige elementen in microsimulaties is het van belang meerdere runs uit te voeren, zodat de invloed van toeval, als gevolg van de stochastische aard, wordt verminderd door het gemiddelde van de runs te nemen en de spreiding van de resultaten te berekenen.

Om te bepalen hoeveel runs nodig zijn om tot het gewenste betrouwbaarheidsniveau te komen, kan de volgende formule worden toegepast (Barceló, 2010):

$$\text{Aantal runs:} \quad n = \frac{2 \cdot z^2 \cdot \sigma^2}{\delta^2} \quad (8)$$

Waarbij:

- n = het aantal benodigde runs
- z = de significantie (1,96 voor 95% betrouwbaarheid)
- σ = de standaardafwijking, tussen de verschillende testruns
- δ = het verschil dat gezien moet kunnen worden

Voor het bepalen van de standaardafwijking (σ) worden vijf testruns uitgevoerd van de avondspits, waarvan het gemiddelde wordt genomen. Deze testruns zijn korter dan de reguliere simulatie-runs (10 minuten in plaats van 2 uur). Paramics past in dit geval automatisch de invoerde intensiteit aan door één zesde (10/60) van de uurintensiteit te hanteren, zodat de verkeersbelasting in tien minuten evenredig overeenkomt met die van een volledig uur.

Bij elke de testrun wordt van de tien verkeersstromen op de Harmsenknoop het aantal voertuigen op de representatieve wegvakken, de reistijd van de routes en de gemiddelde snelheid op de routes bepaald uit de resultaten van Paramics. Vervolgens wordt in Python de bijbehorende standaarddeviatie per route berekend. De σ die in vergelijking 8 wordt ingevuld is de gemiddelde standaarddeviatie van de tien routes. Uit de analyse in Bijlage 20 volgen de volgende gemiddelden van de standaarddeviaties:

- $\sigma_{\text{aantal voertuigen}}$: 1,988
- $\sigma_{\text{reistijden}}$: 4,993
- $\sigma_{\text{snelheden}}$: 1,601

In Tabel 9 wordt met verschillende waarden van δ berekend wat volgens vergelijking 8 het bijbehorende aantal benodigde runs is. Hierbij wordt δ gevarieerd tussen één en twee voor het aantal voertuigen en de snelheid, maar wordt voor de reistijd gekeken naar een δ van drie en vijf seconden.

Tabel 9: Berekening van het aantal runs (n) bij verschillende opties voor δ

	σ	Z(95%)	Optie 1		Optie 2	
			δ	n	δ	n
Aantal voertuigen	1,988	1,96	1	30	2	8
Reistijd	4,993	1,96	3	21	5	8
Snelheid	1,601	1,96	1	20	2	5

Op basis van het berekende aantal runs voor de twee opties uit Tabel 9 en vanwege het feit dat meerdere aspecten tegelijkertijd in de microsimulatie worden geanalyseerd, wordt gekozen om in dit onderzoek tien simulatie-runs uit te voeren. Dit aantal maakt het mogelijk om ook binnen de beperkte tijd betrouwbare resultaten uit de simulaties te verkrijgen. Voor elke variant worden voor zowel de ochtend- als avondspits tien runs uitgevoerd.

10.5 Kalibratie van het microsimulatie model

Hoewel in Paramics het model gekalibreerd wordt met ingebouwde systemen, is het belangrijk om te controleren of de modelresultaten overeenkomen met de realiteit. Dit wordt gedaan door enerzijds een significantietoets uit te voeren en door anderzijds de snelheden in de bochten van het model te vergelijken met de snelheidslimieten in de realiteit. Vervolgens wordt in deze paragraaf ingegaan op de kalibratie van SSAM.

Kalibratie Paramics – significantietoets

De kalibratie van het microsimulatie model van het huidige ontwerp wordt gecontroleerd met een significantietoets. Hierbij worden de berekende intensiteiten in het model (modelwaarden) vergeleken met de daadwerkelijke telgegevens van de wegvakken van de Harmsenknoop in de realiteit (telwaarden). De toets berekent een statistische waarde voor de mate van afwijking tussen de model- en telwaarden. Wanneer deze zogenoemde T-waarde kleiner is dan 3,5, wordt het resultaat als goed en acceptabel beschouwd (Sweco, 2017). Dit betekent dat het model dan voldoende is gekalibreerd.

Voor de vergelijking worden uit het microsimulatie model van het huidige ontwerp, zowel in de ochtend- als avondspits, de aantallen voertuigen verzameld op de representatieve wegvakken van de tien verkeersstromen van de Harmsenknoop. Het gebruikte aantal voertuigen per verkeersstroom is hierbij gebaseerd op het gemiddelde van tien simulatie-runs.

Daarnaast worden daadwerkelijke telgegevens van de betreffende wegvakken van de Harmsenknoop verzameld met behulp van de software Dexter. Dexter registreert telgegevens van de sensoren in het wegennet, net als het INWEVA (Intensiteiten op Wegvakken). Een belangrijk verschil is echter dat Dexter geen ontbrekende telgegevens aanvult op basis van schattingen uit omliggende meetpunten (de Bruijn & van Rongen, 2025). Hierdoor bevat Dexter ruwe en niet-gecorrigeerde data.

Aangezien het microsimulatie model is gebaseerd op intensiteiten afkomstig uit het INWEVA (paragraaf 4.1), kan voor de kalibratie niet opnieuw van dezelfde bron gebruik worden gemaakt. Daarom worden telgegevens uit Dexter benut, waarbij het gemiddelde wordt genomen van de maatgevende maanden oktober en november van 2024. Hierbij is specifiek gekeken naar de spitsuren (ochtendspits: 7:00 – 9:00; avondspits: 16:00 – 18:00) op de drukste dagen: dinsdag en donderdag.

Conform de werkwijzer voor dynamische verkeersmodellen, die wordt gebruikt binnen Rijkswaterstaat en Sweco, wordt de T-waarde van de significantietoets berekend met de formule (Sweco, 2017):

Significantietoets:
$$T = \ln \left(\frac{(TW - MW)^2}{TW} \right) \quad (9)$$

Hierbij verwijst:

- TW naar de gemiddelde telwaarden uit Dexter per spits [vtg/uur]
- MW naar de gemiddelde modelwaarden uit Paramics per spits [vtg/uur]

In Tabel 10 worden voor zowel de ochtend- als avondspits de T-waardes voor de verschillende verkeersstromen op de Harmsenknoop berekend.

Tabel 10: Berekening van de T-waardes voor de ochtend- en avondspits van het huidige ontwerp, waarbij de telwaarden uit Dexter zijn verzameld en de modelwaarden uit het microsimulatie model in Paramics komen. T-waarde < 3,5 is acceptabel.

Verkeersstroom	Ochtendspits			Avondspits		
	Tel-waarden	Model-waarden	T-waarde	Tel-waarden	Model-waarden	T-waarde
A15 West → Calandbrug	95	67	2,11	61	88	2,48
A15 West → Thomassentunnel	1063	1029	0,08	1577	1718	2,53
A15 West → N57	-	25	-	-	179	-
Calandbrug → A15 West	-	19	-	-	27	-
Calandbrug → N57	271	294	0,67	323	428	3,53*
N57 → Calandbrug	471	544	2,43	397	408	-1,19
N57 → Thomassentunnel	1451	1413	0,00	705	734	0,18
N57 → A15 West	-	208	-	-	62	-
Thomassentunnel → A15 West	1739	1576	2,73	832	795	0,50
Thomassentunnel → N57	674	692	-0,73	1603	1681	1,33

* Deze waarde ligt net boven de grens van 3,50 en heeft daardoor een gele kleur.

Uit Tabel 10 blijkt dat 13 van de 14 berekende T-waardes onder de grenswaarde van 3,5 liggen. Op basis van de richtlijnen uit de werkwijzer dynamische modellen kan hieruit worden geconcludeerd dat het modelresultaat acceptabel is (Sweco, 2017). Dit impliceert dat het microsimulatiemodel voldoende overeenkomt met de werkelijke situatie, ondanks het ontbreken van telgegevens in Dexter voor drie van de tien onderzochte verkeersstromen. Het model kan daarom als goed gekalibreerd worden beschouwd.

Kalibratie Paramics – vergelijking van snelheden

Naast de significantietoets is de kalibratie van het microsimulatie model in Paramics aanvullend gecontroleerd door de gereden snelheden in bochten te vergelijken met de geldende snelheidslimieten in de realiteit. Deze controle wordt gedaan om te voorkomen dat het model de voertuigen onrealistisch hard in de bochten laat rijden. Een directe vergelijking met werkelijk gemeten snelheden was echter niet mogelijk, omdat de verkeersadviseurs van Rijkswaterstaat aangaven dat de bochten van de Harmsenknoop geen sensoren bevatten (de Bruijn & van Rongen, 2025).

Tabel 11 toont een vergelijking tussen de snelheidslimieten in de realiteit en de gemiddelde gereden snelheden in de scherpe bochten van het model tijdens de ochtend- en avondspits. De bochten zijn hierbij genummerd per verbindingsweg, beginnend bij de meest stroomopwaartse bocht. Bijvoorbeeld: de verbindingsweg Thomassentunnel → N57 bevat twee bochten, waarvan bocht 1 als eerste wordt gepasseerd door het verkeer en bocht 2 als tweede. Omdat bocht 1 een boog van 180 graden vormt, is deze verder onderverdeeld in een eerste en tweede helft, zodat snelheidsverloop binnen de bocht beter kan worden geanalyseerd.

Tabel 11: Vergelijking tussen de snelheidslimieten in de realiteit en de gemiddelde gereden snelheden in het model

Verkeersstroom	Bocht	Snelheidslimiet in de realiteit	Gemiddelde snelheid in het model [km/h]	
			Ochtendspits	Avondspits
A15 West → N57	Bocht 1 voor eerste voorrangskruising	50 km/h	3,71*	9,04*
N57 → Thomassentunnel	Bocht 1	50 km/h	41,88	51,43
	Bocht 2	50 km/h	26,67	28,31
	Bocht 3	50 km/h	28,95	28,97
Thomassentunnel → N57	Bocht 1 deel 1	50 km/h	27,10	26,14
	Bocht 1 deel 2	50 km/h	29,17	28,43
	Bocht 2	50 km/h	30,84	30,76

* Deze gemiddelde snelheden vallen lager uit vanwege de stoptijden voor het kruisende verkeer.

Uit Tabel 11 blijkt dat de in het model geregistreerde snelheden lager liggen dan de geldende snelheidslimieten in de werkelijkheid. Dit is positieve bevinding, aangezien weggebruikers door de krappe bochten voldoende dienen af te remmen om deze veilig te passeren. Bovendien moet het verkeer op de route A15 West → N57 voorrang verlenen aan kruisend verkeer, wat resulteert in lagere snelheden als gevolg van stoptijden.

Hoewel in de microsimulatie een snelheidslimiet kan worden opgegeven, is het mogelijk dat voertuigen in de simulatie harder rijden dan de limiet, vanwege de stochastische verdeling van snelheidsprofielen. Het feit dat de gereden snelheden in de bochten niet hoger zijn dan de snelheidslimieten, ondersteunt de conclusie dat het microsimulatiemodel op acceptabele wijze is gekalibreerd en versterkt het vertrouwen in de representativiteit van de simulatie-uitkomsten.

Kalibratie SSAM

Aangezien SSAM de conflictanalyse automatisch uitvoert op basis van de gegenereerde voertuigtrajecten uit Paramics, is het niet mogelijk om deze analyse handmatig te kalibreren of te beïnvloeden (Gettman & Shelby, 2008). Wel kunnen grenswaarden worden ingesteld voor de

parameters TTC (Time to Collision), PET (Post Encroachment Time) en DeltaS (snelheidsverschil), zodat uitsluitend conflicten worden meegenomen die voldoen aan de gespecificeerde veiligheidscriteria.

Door de verwachte conflicten volgens SSAM te vergelijken met de ongevallendata uit VIA, kan de gegenereerde output van SSAM in perspectief worden geplaatst. Uit deze ongevallendata blijkt dat in de afgelopen elf jaar in totaal 39 ongevallen op de Harmsenknoop hebben plaatsgevonden (VIA - Rijkswaterstaat, 2024). De SSAM-analyse van het huidige ontwerp van de Harmsenknoop, op basis van de intensiteiten uit het INWEVA van 2023, voorspelt in de ochtendspits 3.406 conflicten en in de avondspits 3.889 conflicten. Bij nadere bestudering van deze conflicten blijkt echter dat SSAM geen rekening houdt met de Z-coördinaat (hoogte) van de voertuigtrajecten. Hierdoor worden ook conflicten geregistreerd op locaties waar sprake is van ongelijkvloerse kruisingen, terwijl dergelijke conflicten in werkelijkheid niet kunnen plaatsvinden. Een voorbeeld hiervan is de situatie waarbij de N57 na de Harmsenbrug de A15 ongelijkvloers kruist. Desondanks detecteert SSAM hier conflicten van het type 'kruising', die feitelijk onmogelijk zijn door het hoogteverschil tussen de rijbanen.

Om deze verkeerd gegenereerde conflicten uit de analyse te filteren, is een aanvullende bewerking uitgevoerd. Hierbij is met behulp van Python-code per conflict het tijdstip van het incident uit SSAM gekoppeld aan de corresponderende Z-coördinaten van de betrokken voertuigen in de gegevens van de voertuigtrajecten uit Paramics. Vervolgens zijn alle conflicten met een hoogteverschil van meer dan één meter tussen de betrokken voertuigen verwijderd uit de dataset.

Deze correctie resulteert in een aangepaste dataset met 832 overblijvende conflicten in de ochtendspits en 1.132 conflicten in de avondspits. Hiermee wordt een realistischer beeld verkregen van de potentiële conflicten in het huidige ontwerp, waarbij alleen gelijkvloerse interacties worden meegenomen. De locatie en typering van deze conflicten (rear end (= kop-staartbotsing), lane change (= rijstrookwissel) of crossing (= kruising)) zijn weergegeven in Bijlage 22.

Desondanks ligt het aantal voorspelde conflicten aanzienlijk hoger dan het aantal geregistreerde ongevallen. Volgens onderzoek van Vasconcelos et al. (2014) komt dit doordat SSAM alle situaties registreert waarin twee voertuigen elkaar in tijd en ruimte naderen. In veel gevallen leiden deze situaties echter niet tot daadwerkelijke ongevallen, dankzij het anticiperend en corrigerend vermogen van de weggebruiker. Deze 'near-misses' worden desalniettemin in SSAM als conflict geregistreerd (Vasconcelos, Neto, & et al., 2014).

Hoewel SSAM daarmee een overschatting van het absolute aantal conflicten lijkt te geven, wordt in Hoofdstuk 11 en 12 onderzocht in hoeverre SSAM geschikt is om veiligheidsverschillen tussen ontwerpvarianten onderling te vergelijken. Indien dit mogelijk is, zou SSAM een bijdrage kunnen leveren bij het onderbouwen van ontwerpkeuzes in het wegontwerpproces.

11. Ontwerpvarianten analyseren met microsimulaties

In dit hoofdstuk worden de volgende ontwerpvarianten geanalyseerd met microsimulaties:

1. Huidige ontwerp met toekomstige intensiteiten (nul variant);
2. Ideale ontwerp met toekomstige intensiteiten;
3. Realistische ontwerp met toekomstige intensiteiten.

De microsimulaties worden ingezet om de doorstromings- en verkeersveiligheidsaspecten van de ontwerpen kwantitatief in kaart te brengen. Dit maakt het mogelijk om verschillen tussen de varianten objectief te vergelijken en verbeterpunten te identificeren. Daarnaast wordt onderzocht in hoeverre microsimulaties realistische en gedetailleerde inzichten bieden als aanvulling of alternatief voor expertbeoordelingen binnen het wegontwerpproces.

Bij deze analyse worden, op basis van de mogelijkheden van Paramics en Surrogate Safety Assessment Model (SSAM), de volgende doorstromings- en verkeersveiligheidsaspecten onderzocht:

- Gemiddelde reistijden per route over de Harmsenknoop;
- Reistijdverliesuren per route en de totale som;
- Gemiddelde snelheden per route over de Harmsenknoop;
- Het aantal afgewikkelde voertuigen;
- Het aantal conflicten en de percentuele verdeling per type conflict;
- Locatie van voorspelde conflicten;
- Gemiddelde Time-To-Collision (TTC) waarden;
- Gemiddelde Post-Encroachment Time (PET) waarden;
- Gemiddelde snelheidsverschillen bij de verwachte conflicten (DeltaS waarden).

Omdat het microsimulatie model is opgezet voor de huidige situatie en daarbij ook de parameters van voertuigen zijn gekalibreerd, is het analyseren van de overige ontwerpvarianten eenvoudiger. Het gekalibreerde model van het huidige ontwerp met de actuele verkeersintensiteiten dient daarmee als basis voor de modellen van de toekomstige ontwerpen. Bij het invoeren van deze ontwerpvarianten kunnen dezelfde stappen worden gevolgd als bij het huidige ontwerp. Hoewel kalibratie van de toekomstige situatie niet mogelijk is vanwege het ontbreken van gegevens uit de toekomstige werkelijkheid, biedt de kalibratie van het huidige model met de actuele intensiteiten een solide uitgangspunt voor de microsimulatie modellen van de toekomstige ontwerpvarianten met de verwachte toekomstige verkeersintensiteiten.

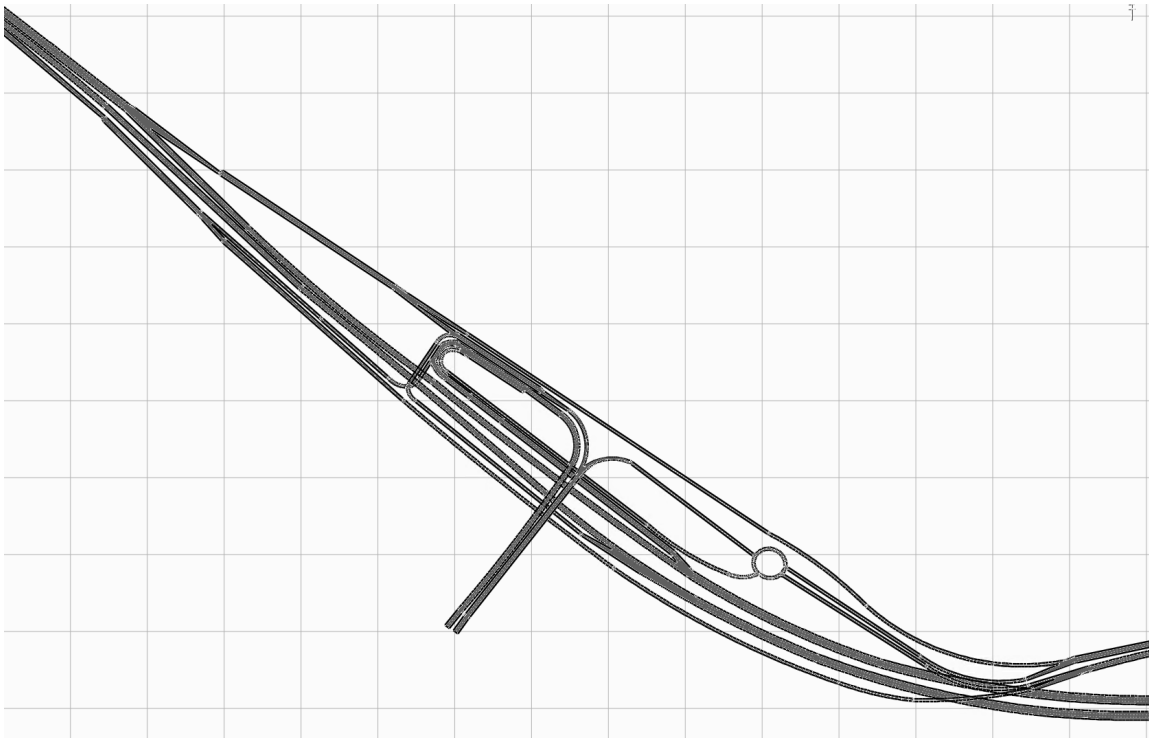
Elke ontwerpvariant wordt afzonderlijk in Paramics gemodelleerd, waarna zowel de ochtendspits als avondspits apart worden gesimuleerd. Per spits worden tien simulatie-runs gedaan, zoals toegelicht in paragraaf 10.4. Paramics genereert voor elke run outputbestanden met een uniform formaat. Hierdoor kan de opgestelde Python-code voor het analyseren van de resultaten en het verwerken van de gegevens opnieuw worden toegepast. Dit vereenvoudigt het vergelijken van de ontwerpvarianten.

In dit hoofdstuk worden eerst per ontwerpvariant de belangrijkste aandachtspunten bij het opstellen van de verschillende ontwerpen in het microsimulatie model besproken. Vervolgens worden de resultaten van de ontwerpvarianten onderling vergeleken.

11.1 Huidige ontwerp met toekomstige intensiteiten

Het huidige ontwerp met toekomstige intensiteiten van 2040 heeft dezelfde lay-out als het model van het huidige ontwerp met de huidige intensiteiten van 2023. Enkel de intensiteiten in de OD-matrices moeten worden veranderd naar de verwachte verkeersintensiteiten van 2040. Deze intensiteiten zijn weergegeven in Tabel 4 in paragraaf 5.2. Figuur 33 geeft een globale weergave van het huidige ontwerp in Paramics. In Bijlage 23 wordt met verschillende figuren verder ingezoomd op dit ontwerp.

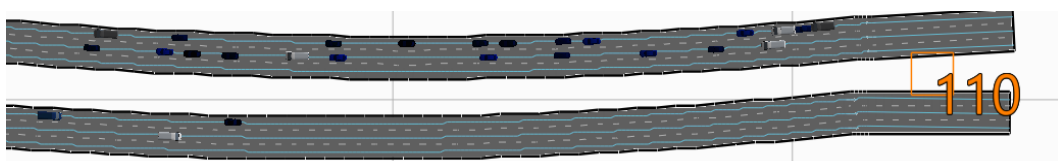
De microsimulatie resultaten van het huidige ontwerp met toekomstige intensiteiten worden in paragraaf 11.4 geanalyseerd en vergeleken de andere ontwerpvarianten.



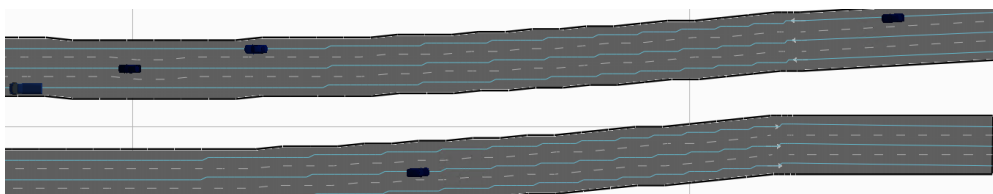
Figuur 33: Globaal overzicht van het huidige ontwerp in het microsimulatie model Paramics

11.2 Ideale ontwerp

Het ideale ontwerp wordt in de microsoftware Paramics gemodelleerd op basis van de gekozen boogstralen, discontinuïteiten en berekende hellingspercentages, zoals beschreven in Hoofdstuk 6 en 7. Wanneer het model wordt gesimuleerd, ontstaat in de avondspits na 40 minuten een file op de A15 Oost in de Thomassentunnel, waardoor niet alle voertuigen in het model kunnen worden ingeladen. Figuur 34 laat het einde van de Thomassentunnel zien, waarbij het oranje getal het aantal voertuigen aangeeft dat niet in het model kan worden ingeladen. In het model is te zien dat bij discontinuïteit 2-i een knelpunt ontstaat, die voor file tot op de A15 zorgt. Deze discontinuïteit is de invoeging van Calandbrug → N57 bij de verbindingsweg Thomassentunnel → N57.



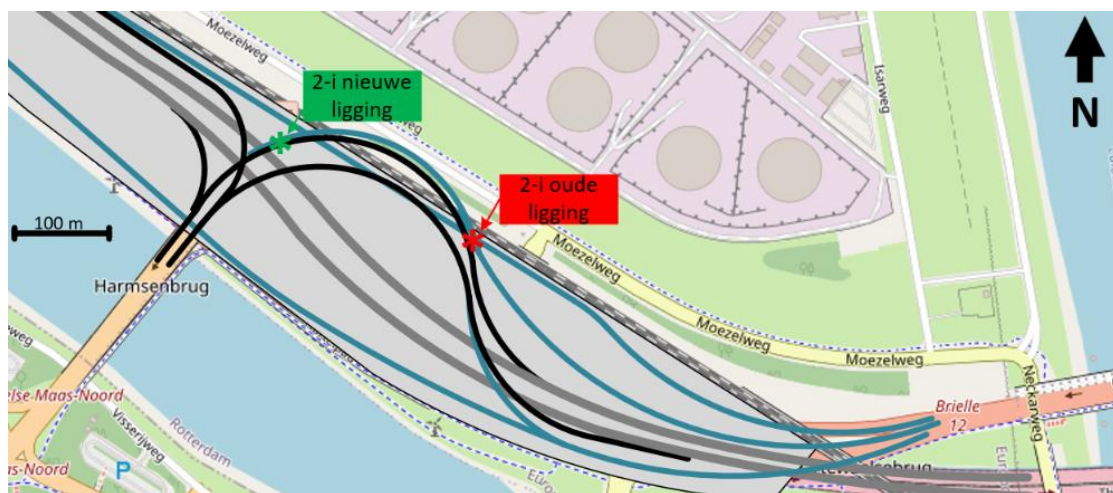
Figuur 34: Microsimulatie model van het ideale ontwerp, waarbij de situatie in de Thomassentunnel in de avondspits na 40 minuten is weergegeven. Er is file vanaf discontinuïteit 2-i, waarbij 110 voertuigen het model niet kunnen betreden.



Figuur 35: Microsimulatie model van het ideale ontwerp, waarbij de intensiteiten van verbindingsweg Calandbrug → N57 op nul zijn gezet. Nu ontstaat in de avondspits geen file vanaf discontinuïteit 2-i en kunnen alle voertuigen het model betreden.

Om te controleren of discontinuïteit 2-i inderdaad de oorzaak van de fileterugslag is, worden de intensiteiten van de verbindingsweg Calandbrug → N57 op nul gezet, waarna de avondspits opnieuw wordt gesimuleerd in de microsimulatie. Figuur 35 laat het einde van de Thomassentunnel zien na twee uur, waarbij nu geen file tot in de Thomassentunnel ontstaat. Daarnaast geeft het model geen getal voor de niet-afgewikkelde voertuigen, waardoor alle voertuigen het model kunnen betreden.

Om toch een verbinding tussen de Calandbrug en N57 mogelijk te maken in het ideale ontwerp, wordt discontinuïteit 2-i 300 meter stroomafwaarts op de verbindingsweg Thomassentunnel → N57 aangesloten. Dit zorgt voor meer ruimte tussen discontinuïteiten 1-u en 2-i, zodat het uitvoegende verkeer vanaf de A15 eerst kan stabiliseren, voordat het met het invoegende verkeer vanaf de Calandbrug moet samenvoegen. In Figuur 36 worden de nieuwe en oude ligging van discontinuïteit 2-i vergeleken.



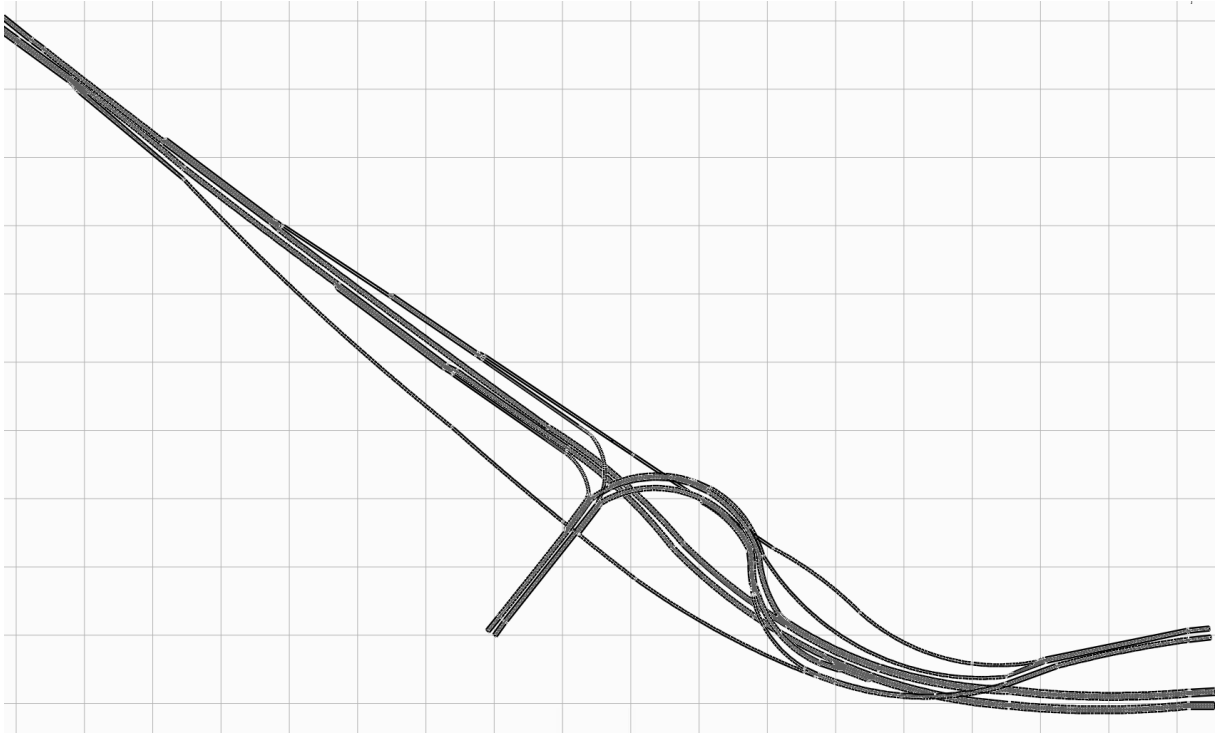
Figuur 36: Aangepaste viltstiftenschets Ideale ontwerp met de oude en nieuwe ligging van discontinuïteit 2-i

Wanneer het ideale ontwerp met deze verlegging van discontinuïteit 2-i in de microsimulatie wordt gesimuleerd, blijkt dat alle voertuigen kunnen worden afgewikkeld zonder dat filevorming optreedt. Dit resultaat is onverwacht, gezien de gehanteerde turbulentieafstanden, zoals beschreven in paragraaf 7.3 en Bijlage 17. Volgens Tabel 6.6 van de Richtlijnen Ontwerp Autosnelwegen (ROA) was de turbulentieafstand tussen de uitvoeging bij de snelweg en discontinuïteit 2-i namelijk toereikend. Daarentegen voldeed de afstand tussen discontinuïteit 2-i en de daaropvolgende invoeging van verkeer vanaf de A15 West (discontinuïteit 4-i) niet aan de turbulentieafstanden uit de ROA.

Door de verlegging van discontinuïteit 2-i wordt de afstand tussen 2-i en 4-i nog kleiner, wat volgens de ROA ongunstig zou zijn. Desondanks laat de microsimulatie zien dat deze aanpassing niet leidt tot filevorming. Sterker nog, de file die zich in de oorspronkelijke situatie tussen 2-i en de A15 vormde, wordt in de nieuwe situatie weggenomen.

Voor het ideale ontwerp wordt daarom verder gewerkt met de variant waarin discontinuïteit 2-i 300 meter verder stroomafwaarts is gepositioneerd. De aangepaste viltstiftenschets van deze ideale variant is opgenomen in Bijlage 24.

Figuur 37 toont een globale weergave van het ideale ontwerp in Paramics. In Bijlage 25 wordt met verschillende figuren verder ingezoomd op dit ontwerp. De microsimulatie resultaten van het ideale ontwerp met toekomstige intensiteiten worden in paragraaf 11.4 geanalyseerd en vergeleken met de resultaten van de andere ontwerpvarianten.



Figuur 37: Globaal overzicht van het ideale ontwerp in het microsimulatie model Paramics

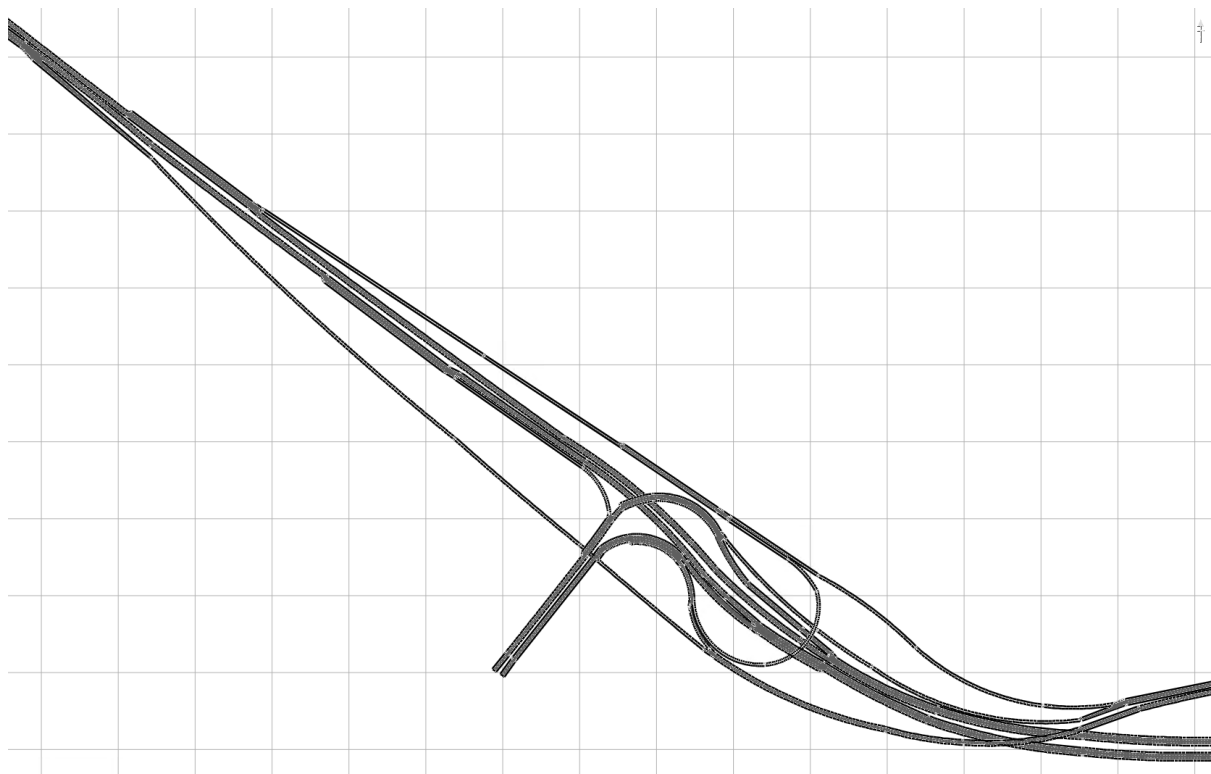
11.3 Realistische ontwerp

Het realistische ontwerp wordt in Paramics gemodelleerd op basis van de gekozen boogstralen, discontinuïteiten en berekende hellingspercentages, zoals beschreven in Hoofdstuk 9. De lay-out van het realistische ontwerp komt grotendeels overeen met die van het ideale ontwerp, met uitzondering van de twee ontwerpconcessies bij de verbindingswegen N57 ↔ Thomassentunnel en N57 → A15 West.

In de avondspits ontstaat na circa 30 minuten file op de A15 Oost in de Thomassentunnel, waardoor niet alle voertuigen in het model kunnen worden ingeladen. Net als bij het ideale ontwerp vormt discontinuïteit 2-i een knelpunt. Echter, wanneer in het model van het realistische ontwerp de intensiteit van de verbindingsweg Calandbrug → N57 op nul wordt gezet, blijft de filevorming op de A15 bestaan. Dit duidt erop dat de file niet alleen door discontinuïteit 2-i wordt veroorzaakt.

Ten opzichte van het ideale ontwerp zijn bij de verbindingsweg Thomassentunnel → N57 de boogstraal verkleind en ontwerpsnelheid verlaagd. Het is aannemelijk dat deze concessies de toegenomen filevorming verklaart. Bovendien is het vanwege de beperkte lengte van de boog niet mogelijk om discontinuïteit 2-i verder stroomopwaarts te verplaatsen. Hierdoor wordt in het vervolg van dit onderzoek gewerkt met het oorspronkelijke model van het realistische ontwerp.

Figuur 38 toont een globale weergave van het realistische ontwerp in Paramics. In Bijlage 26 wordt met verschillende figuren verder ingezoomd het ontwerp. De microsimulatie resultaten van het realistische ontwerp met toekomstige intensiteiten worden in paragraaf 11.4 geanalyseerd en vergeleken met de resultaten van de andere ontwerpvarianten.



Figuur 38: Globaal overzicht van het realistische ontwerp in het microsimulatie model Paramics

11.4 Analyse en vergelijking microsimulatie resultaten

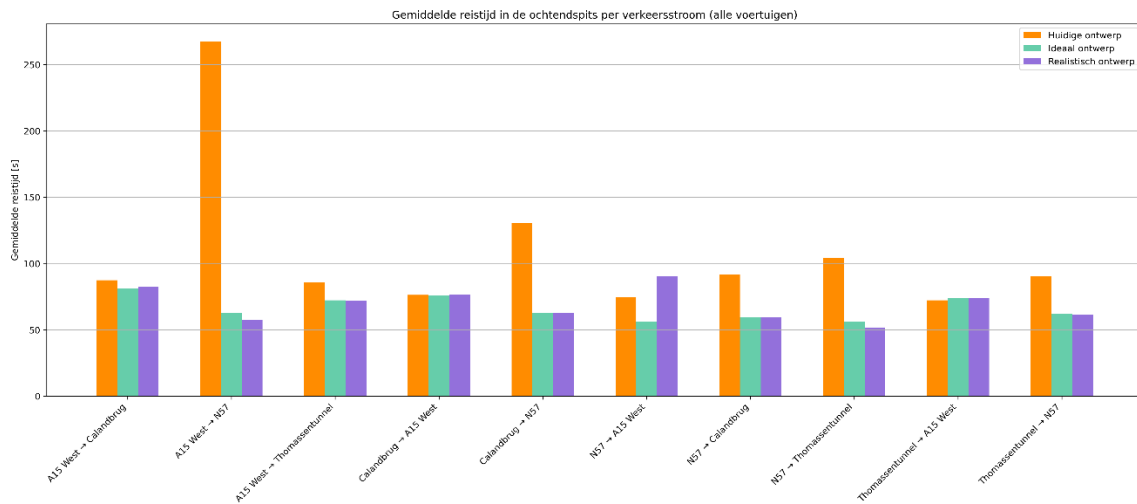
In deze paragraaf worden de microsimulatie resultaten uit Paramics en SSAM geanalyseerd, waarbij de resultaten van de drie varianten (huidig, ideaal en realistisch ontwerp) worden vergeleken. Deze resultaten vormen de basis voor de evaluatie van de doorstromings- en verkeersveiligheidsaspecten van de verschillende ontwerpvarianten. Deze evaluatie wordt gedaan met behulp van experts bij Rijkswaterstaat en dit wordt beschreven in Hoofdstuk 12.

Op basis van de mogelijkheden van Paramics en SSAM worden de volgende resultaten uit de microsimulatie geanalyseerd:

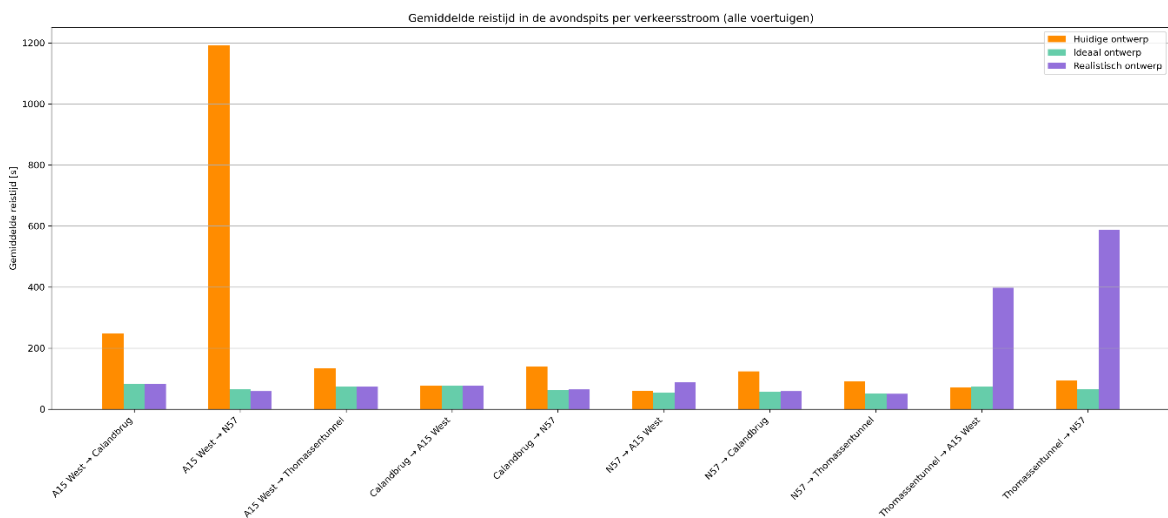
- Gemiddelde reistijden per route over de Harmsenknoop;
- Reistijdverliesuren per route en de totale som;
- Gemiddelde snelheden per route over de Harmsenknoop;
- Het aantal afgewikkelde voertuigen;
- Het aantal conflicten en de percentuele verdeling per type conflict;
- Locatie van voorspelde conflicten;
- Gemiddelde Time-To-Collision (TTC) waarden;
- Gemiddelde Post-Encroachment Time (PET) waarden;
- Gemiddelde snelheidsverschillen bij de verwachte conflicten (DeltaS waarden).

Gemiddelde reistijden

Voor elke ontwerpvariant wordt de gemiddelde reistijd per route over de Harmsenknoop bepaald door eerst per OD-paar de reistijd per simulatie-run te berekenen. Vervolgens wordt het gemiddelde van de tien verschillende runs als gemiddelde reistijd genomen. In Figuur 39 en Figuur 40 zijn de gemiddelde reistijden van de tien verkeersstromen in de ochtend- en avondspits weergegeven. Daarnaast zijn in Bijlage 27 de reistijden van personenauto's en vrachtverkeer apart bekeken en wordt de standaarddeviatie gegeven om de spreiding van het berekende gemiddelde aan te geven.



Figuur 39: Gemiddelde reistijd in seconden in de ochtendspits per verkeersstroom van de drie ontwerpvarianten



Figuur 40: Gemiddelde reistijd in seconden in de avondspits per verkeersstroom van de drie ontwerpvarianten

Uit Figuur 39 en Figuur 40 blijkt dat de gemiddelde reistijden in de ideale en realistische varianten over het algemeen lager zijn dan in het huidige ontwerp. Dit heeft een positief gevolg voor de doorstroming, omdat kortere reistijden leiden tot minder reistijdverlies.

Vooraf bij de verkeersstroom A15 West → N57 is zowel in de ochtend- als avondspits een forse afname in reistijd te zien. Dit komt doordat de gelijkvloerse voorrangskruisingen uit het huidige ontwerp in de ideale en realistische variant zijn vervangen door ongelijkvloerse kruisingen. Dit maakt het mogelijk dat het verkeer op deze route niet hoeft te stoppen voor kruisend verkeer.

Echter is bij de verkeersstroom N57 → A15 West in de realistische ontwerpvariant een toename in reistijd te zien in vergelijking met zowel het ideale als het huidige ontwerp. De reden hiervoor is dat deze verbindingsweg is omgelegd, waardoor met deze ontwerpconcessie een ongelijkvloerse kruising met drie verdiepingen wordt voorkomen. De lengte van deze verbindingsweg is zodoende 960 meter geworden in plaats van 335 meter in de ideale ontwerpvariant.

Daarnaast laat de avondspits een forse toename in de reistijden van de verkeersstromen Thomassentunnel → N57 en Thomassentunnel → A15 West zien. Dit komt doordat in de realistische variant een ontwerpconcessie is doorgevoerd om geen verbindingswegen boven de Havenspoorlijn te realiseren. Hierdoor is ten opzichte van het ideale ontwerp bij de verbindingsweg Thomassentunnel → N57 de boogstraal verkleind en ontwerpsnelheid verlaagd. De filevorming op de verbindingsweg Thomassentunnel → N57 zorgt tevens voor file in de Thomassentunnel, waardoor ook de reistijd van

het verkeer op de route Thomassentunnel → A15 West oploopt. De bijbehorende reistijdverliesuren worden hieronder geanalyseerd.

Reistijdverliesuren

Om de afname van de gemiddelde reistijden kwantitatief uit te drukken, wordt het aantal reistijdverliesuren van elke ontwerpvariant berekend. Dit wordt gedaan door per ontwerp apart te kijken naar de gemiddelde reistijd en vrije reistijd van elke verkeersstroom. De vrije reistijd verwijst hierbij naar de reistijd zonder file en kan worden bepaald door naar de reistijden van de eerste vijf minuten van de simulatie te kijken (Sweco, 2017). Tijdens deze eerste vijf minuten bevinden zich namelijk weinig voertuigen in het model, waardoor kan worden aangenomen dat de bijbehorende reistijden de vrije reistijd representeert.

Door vervolgens het verschil tussen de gemiddelde en vrije reistijd te vermenigvuldigen met het aantal voertuigen op de bijbehorende route (intensiteit), kan het aantal reistijdverliesuren worden bepaald. In Bijlage 27 wordt de berekening van het aantal reistijdverliesuren van de drie varianten voor zowel de ochtend- als avondspits bepaald. Tabel 12 geeft een overzicht van de totale som van de reistijden.

Tabel 12: Vergelijking van de totale reistijdverliesuren van de drie ontwerpvarianten in de ochtend- en avondspits

Verkeersstroom	Huidig ontwerp	Ideaal ontwerp	Realistisch ontwerp
Ochtendspits	24	11	8
Avondspits	49	10	369

Uit Tabel 12 volgt dat het ideaal ontwerp zowel in de ochtend- als avondspits minder reistijdverliesuren oplevert. Dit is respectievelijk 54% en 80% reistijdwinst in vergelijking met het huidige ontwerp.

De realistische variant heeft in de ochtendspits een reistijdwinst van 67%. De avondspits daarentegen heeft in het realistische ontwerp een forse toename van de reistijdverliesuren. Dit resulteert in een verlies van 753% in vergelijking met het huidige ontwerp. Waarschijnlijk komt dit doordat de scherpe bocht van de verbinding Thomassentunnel → N57 in het huidige ontwerp op grotere afstand van de uitvoeging vanaf de A15 ligt. Hierdoor kan het verkeer in de huidige situatie eerst stabiliseren voordat voor de scherpe bocht afgeremd moet worden, waardoor de file minder snel tot op de A15 terugloopt.

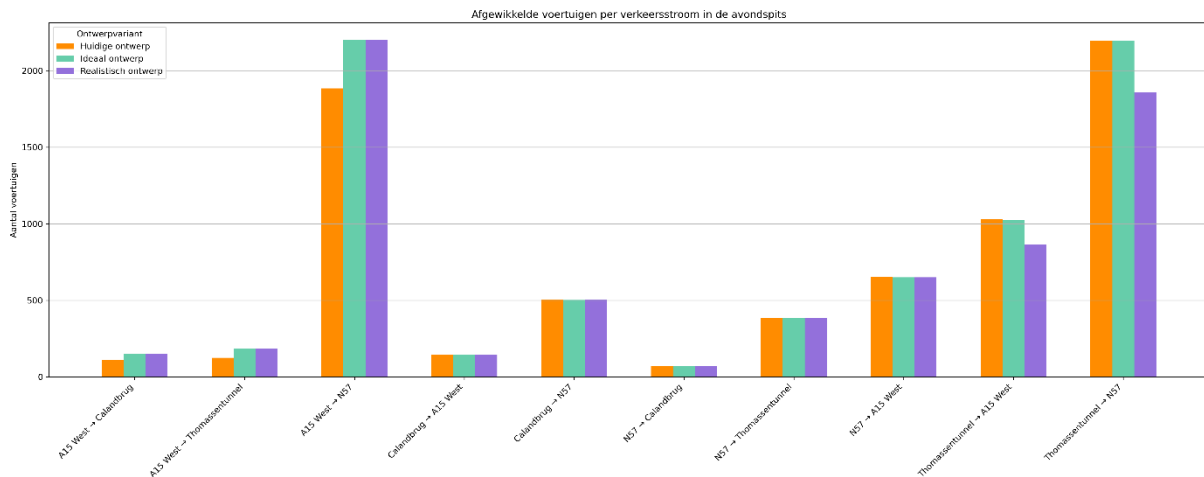
Gemiddelde snelheden

In Bijlage 27 wordt de gemiddelde snelheid van de verschillende verkeersstromen per ontwerpvariant geanalyseerd. Uit deze analyse blijkt dat de toe- en afname in snelheid omgekeerd evenredig zijn met de reistijdwinst. Dit betekent dat op de meeste routes in het ideaal en realistische ontwerp een toename in snelheid is te zien, doordat de verbindingswegen meer direct en ongelijkvloers zijn aangelegd. Dit past bij de bijbehorende afname in reistijd, ofwel reistijdwinst.

Daarentegen laat de realistische variant in de avondspits een forse afname in snelheid zien op de routes Thomassentunnel → N57 en Thomassentunnel → A15 West. Dit komt door de filevorming op deze routes en is daarmee in lijn met de forse toename in reistijd in de avondspits van deze variant.

Aantal voertuigen

Doordat in het huidige ontwerp filevorming optreedt door de voorrangskruispunten op de route A15 West → N57, kunnen niet alle voertuigen in het model van het huidige ontwerp worden ingeladen. Hetzelfde geldt voor de simulatie van de avondspits van de realistische ontwerpvariant, waarbij file wordt gevormd op de verbindingsweg Thomassentunnel → N57 en de A15 Oost. Om het aantal afgewikkelde voertuigen in de simulaties van de drie ontwerpvarianten te vergelijken, worden de afgewikkelde voertuigen van de tien verkeersstromen in het model nader bekeken. Figuur 41 geeft de afgewikkelde voertuigen in de avondspits van de drie ontwerpvarianten.



Figuur 41: Vergelijking van de afgewikkelde voertuigen in de simulatie van de avondspits

Figuur 41 laat zien dat de verkeersstromen vanaf de A15 West, dat zijn de linker drie stromen in de grafiek, inderdaad minder afgewikkelde voertuigen hebben dan de ideale en realistische variant. Daarnaast is bij de twee rechter verkeersstromen in de grafiek te zien dat juist de realistische variant minder voertuigen afwikkelt op de routes Thomassentunnel → N57 en Thomassentunnel → A15 West.

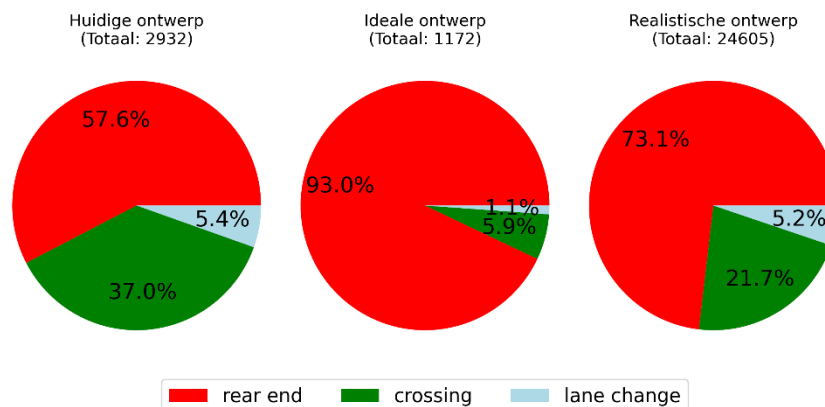
In Hoofdstuk 12 wordt geëvalueerd of deze niet-afgewikkelde voertuigen de resultaten voor de doorstroming en verkeersveiligheid beïnvloeden.

Het aantal verwachte conflicten volgens SSAM en bijbehorende categorisering

Op basis van de door Paramics gegenereerde voertuigtrajecten berekent de software SSAM het aantal verwachte conflicten. Deze conflicten worden, aan de hand van de hoek tussen de betrokken voertuigen, ingedeeld in drie categorieën: kop-staartbotsingen ('rear end'), botsingen door rijstrookwisselingen ('lane change') en botsingen op kruisingen ('crossing').

Na het verwijderen van conflicten waarbij het hoogteverschil tussen de voertuigen meer dan één meter bedraagt, worden de resterende conflicten onderverdeeld in deze drie categorieën. Figuur 42 toont per variant met een cirkeldiagram de verdeling van de verwachte conflicten tijdens de avondspits. De verdeling van conflicten gedurende de ochtendspits is weergegeven Bijlage 27.

Verdeling conflict types in de avondspits



Figuur 42: Drie cirkeldiagrammen voor de verdeling van de conflict types in de avondspits per variant

Uit Figuur 42 blijkt dat SSAM in zowel de ideale als de realistische variant kruisingsconflicten ('crossing') voorspelt, terwijl deze ontwerpen geen gelijkvloerse kruisingen bevatten. Daarnaast is het aantal conflicten in de ideale variant afgenomen ten opzichte van het huidige ontwerp: 1.172 tegenover 2.932 verwachte conflicten. In de realistische variant voorspelt SSAM echter ongeveer 24.600 conflicten, wat

erop kan duiden dat SSAM moeite heeft om conflicten tussen voertuigen in een file correct te voorspellen. Dit wordt in het volgende hoofdstuk geëvalueerd met experts.

Dat SSAM moeite heeft om conflicten tussen voertuigen in file te voorspellen, wordt bevestigd door Figuur 43, waarin het aantal conflicten gedurende de avondspits van de realistische ontwerpvariant is uitgezet tegenover de simulatietijd. In de eerste tien tot twintig minuten zijn namelijk minder conflicten dan vanaf het moment dat de file ontstaat (ongeveer na 30 minuten). Tevens is in Figuur 43 te zien dat het aantal conflicten tijdens de fileperiode (van minuut 30 tot 120) relatief constant blijft. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat Paramics geen nieuwe voertuigen meer inlaadt zodra het model vanwege de file als vol wordt beschouwd.



Figuur 43: Overzicht van het aantal conflicten per tien minuten in de avondspits van de realistische variant

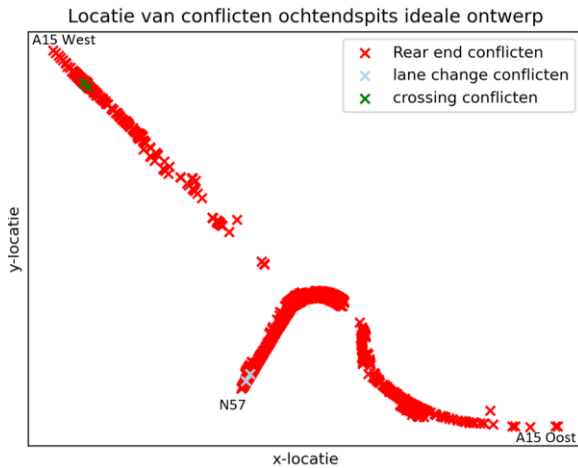
Tegelijkertijd voorspelt SSAM in de eerste tien minuten van de avondspits van de realistische variant circa 500 conflicten, wat ongeveer de helft is van het totale aantal conflicten dat in de twee uur durende avondspits van de ideale variant wordt verwacht. Dit duidt erop dat de realistische variant volgens SSAM ook zonder file tot meer conflicten zou leiden.

Voor alle drie de varianten worden de meeste conflicten van het type kop-staartbotsing verwacht. Hoewel het totale aantal voorspelde conflicten beduidend hoger ligt dan op basis van historische ongevalldata te verwachten is, wordt SSAM in de verdere analyse gebruikt om de varianten relatief ten opzichte van elkaar te vergelijken. Op basis van het totaal aantal verwachte conflicten lijkt het ideale ontwerp minder conflicten te genereren, waardoor deze variant op het eerste gezicht verkeersveiliger lijkt.

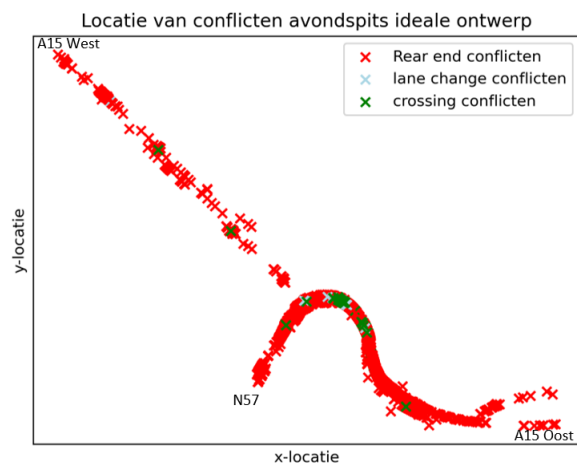
Locatie van de verwachte conflicten

Naast het categoriseren van conflicten, kan SSAM ook de locatie van de verwachte conflicten bepalen. In Figuur 44 en Figuur 45 zijn de locaties van deze conflicten weergegeven voor de ideale ontwerpvariant, respectievelijk tijdens de ochtend- en avondspits.

Tijdens de ochtendspits blijken vrijwel alle conflicten kop-staartbotsingen ('rear end') te zijn. Deze conflicten vinden voornamelijk plaats op de A15 en op de verbindingswegen tussen de Thomassentunnel en de N57. Op basis hiervan kan worden geconcludeerd dat de rijstrookwisselingen nabij de discontinuïteiten in de ochtendspits volgens SSAM niet leiden tot conflicten van het type rijstrookwisseling ('lane change'). Hoewel niet met zekerheid kan worden gezegd of dit ook voor de kop-staartbotsingen geldt, is dit een opmerkelijk resultaat. Het ideale ontwerp voldoet namelijk niet op alle punten aan de minimaal vereiste turbulentieafstanden volgens de Richtlijnen Ontwerp Autosnelwegen (ROA), zoals besproken in paragraaf 7.3.



Figuur 44: Ideaal ontwerp (ochtendspits): Locatie van de verwacht conflicten volgens SSAM

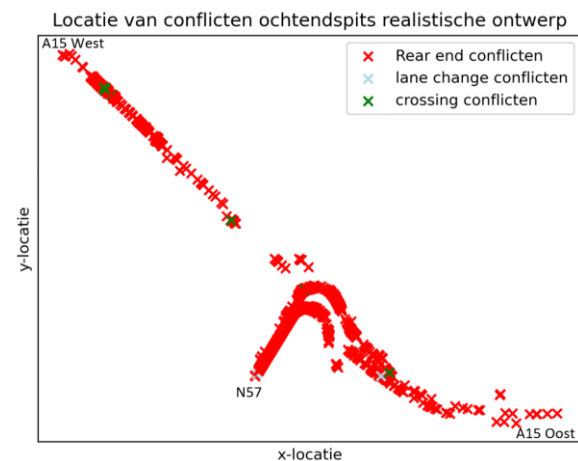


Figuur 45: Ideaal ontwerp (avondspits): Locatie van de verwacht conflicten volgens SSAM

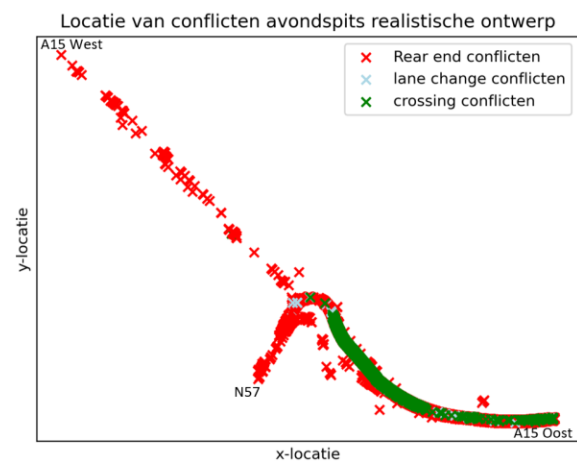
In de avondspits definieert SSAM sommige conflicten bij de discontinuïteiten wel als kruisingsconflicten, terwijl het hierbij waarschijnlijk om baanveranderingsconflicten hoort te gaan.

In Figuur 46 en Figuur 47 zijn de locaties van de verwachte conflicten weergegeven voor de realistische ontwerpvariant, zowel voor de ochtend- als avondspits. In beide spitsen worden veel kopstaartbotsingen ('rear end') verwacht op de verbindingswegen tussen de Thomassentunnel en de N57. Dit zou kunnen worden veroorzaakt door de krappe boogstraal en de benodigde remvertragingen om de boog met een lagere snelheid te kunnen passeren.

Daarnaast bevestigt de locatie van de conflicten die SSAM onterecht aanduidt als kruisingsconflicten, de aanname dat SSAM moeite heeft met het correct voorspellen van conflicten in file. Deze conflicten liggen namelijk op de verbindingsweg Thomassentunnel → N57 en op de A15 Oost nabij de Thomassentunnel. Deze locaties komen exact overeen met de locatie van de file volgens het model van Paramics.



Figuur 46: Realistisch ontwerp (ochtendspits): Locatie van de verwacht conflicten volgens SSAM



Figuur 47: Realistisch ontwerp (avondspits): Locatie van de verwacht conflicten volgens SSAM

TTC, PET en DeltaS

SSAM is in staat om de veiligheid van de drie varianten uit te drukken in de volgende waarden:

- Time to Collision (TTC) (= tijd tot botsing) staat voor de minimale tijd tot een botsing tussen twee voertuigen, als ze doorgaan met hun huidige snelheid en richting. Hoe lager de TTC, hoe gevaarlijker de situatie. SSAM gebruikt drempelwaarde $TTC < 1,5$ om conflicten te definiëren.

- Post-Encroachment Time (PET) (= tijd na inbreuk) is de tijd die verstrijkt tussen het verlaten van een kritieke ruimte door één voertuig en het betreden van deze ruimte door een ander voertuig. Hierbij wijst een kleinere waarde voor PET op een grotere kans op een conflict.
- Snelheidsverschil (DeltaS) is het verschil in snelheid tussen twee voertuigen in een conflict. De kans op ernstige gevolgen is groter, als het snelheidsverschil groter is.

In Bijlage 27 worden deze waardes geanalyseerd voor de drie ontwerpvarianten. De gemiddelde waardes voor TTC, PET en DeltaS worden bepaald door het gemiddelde te nemen van de tien simulatie runs. Daarbij wordt voor elke ontwerpvariant afzonderlijk gekeken naar de ochtend- en avondspits. Daarnaast worden in Bijlage 27 de gemiddelde waardes van TTC, PET en DeltaS uitgesplitst naar de drie conflicttypes en wordt ook de maximale waarde van DeltaS bepaald. In Tabel 13 worden de resultaten van de veiligheidsparameters weergegeven.

Tabel 13: Overzicht van de veiligheidsparameters TTC, PET en DeltaS voor de drie ontwerpvarianten volgens SSAM

Ontwerpvariant	Spitsperiode	Gemiddelde TTC [s]	Gemiddelde PET [s]	Gemiddelde DeltaS [km/h]	Maximale DeltaS [km/h]
Huidige ontwerp	Ochtendspits	0,796	0,902	4,975	53,130
	Avondspits	0,554	0,746	6,388	32,130
Ideale ontwerp	Ochtendspits	0,422	0,477	4,966	66,400
	Avondspits	0,462	0,507	6,002	63,680
Realistische ontwerp	Ochtendspits	0,567	0,434	6,795	64,960
	Avondspits	0,519	0,766	3,542	62,990

Uit Tabel 13 blijkt dat de ideale ontwerpvariant bij alle parameters beter scoort dan de huidige en realistische variant. De realistische variant scoort over het algemeen beter dan het huidige ontwerp. Opvallend is dat het maximale snelheidsverschil tussen de betrokken voertuigen in conflicten in de huidige ontwerp lager ligt dan in de ideale en realistische variant. Een verklaring hiervoor is dat de ontwerpssnelheden in de nieuwe varianten hoger liggen dan in het huidige ontwerp.

In het volgende hoofdstuk worden de resultaten van de microsimitaties uit Paramics en SSAM geëvalueerd met een verkeersveiligheidsexpert en een verkeersadviseur, waarbij respectievelijk de verkeersveiligheids- en doorstromingsaspecten worden beoordeeld.

12. Evaluatie van ontwerp en microsimulatie resultaten

In dit hoofdstuk worden het ontwerp en de uitkomsten van de microsimulatie geëvalueerd. Hierbij worden de ontwerpvarianten en de resultaten van de microsimulaties besproken met een verkeersveiligheidsexpert en een verkeersadviseur, voor respectievelijk de verkeersveiligheids- als doorstromingsaspecten. Het doel is om de ontwerpvarianten te evalueren en om de betrouwbaarheid en toepasbaarheid van microsimulaties binnen het wegontwerpproces te beoordelen. Vervolgens worden de voor- en nadelen van de ontwerpvarianten overzichtelijk weergegeven en worden de sterke en zwakke punten van de gebruikte microsimulatie software geëvalueerd.

12.1 Evaluatie doorstromingsaspecten

De doorstromingsaspecten van de verschillende ontwerpvarianten zijn met de microsimulatie software Paramics gegenereerd. De vergelijking van de gemiddelde reistijden en snelheden van de drie ontwerpvarianten (huidig, ideaal en realistisch) laten volgens verkeersadviseur Giel de Bruijn, werkzaam bij Rijkswaterstaat, zien dat het ideale en realistische ontwerp beter presteren dan het huidige ontwerp.

Daarnaast toont de microsimulatie volgens de verkeersadviseur direct het knelpunt van de realistische variant, namelijk de file op de verbindingsweg Thomassentunnel → N57, die doorwerkt op de A15 Oost. De waarde van de microsimulatie zit volgens hem vooral in het inzicht dat het model geeft in de oorzaak van deze filevorming, namelijk de benodigde remvertragingen voor de krappe bocht in het realistische ontwerp (de Bruijn, 2025). Dit knelpunt wordt verder bevestigd door de reistijdverliesuren, waarbij het model het pijnpunt van het realistische ontwerp duidelijk zichtbaar maakt. Deze resultaten bieden aanknopingspunten voor vervolgonderzoek, waarin de reistijdverliesuren kunnen worden vertaald naar economische waarde. Het zou kunnen blijken dat hiermee de aanlegkosten van het duurdere, ideale ontwerp kunnen worden terugverdiend. Deze eenmalige investering zou dan dagelijks resulteren in minder reistijdverliesuren.

Hoewel Paramics geen rekening houdt met de gevolgen van verminderd zicht door slechte weersomstandigheden of de tunnelomgeving is op basis van de filelocatie in het model af te leiden dat deze ook in de Thomassentunnel doorwerkt (de Bruijn, 2025). Filevorming in tunnels wordt door Rijkswaterstaat als onveilig beschouwd, waardoor maatregelen noodzakelijk zijn om te voldoen aan de tunnelstandaarden (Rijkswaterstaat, 2019). Een logische vervolgstap is het onderzoeken van mitigerende maatregelen voor de verbindingsweg Thomassentunnel → N57.

Volgens de verkeersadviseur is het knelpunt van deze verbindingsweg binnen de realistische ontwerpvariant dermate groot, dat het de positieve effecten op andere verbindingen overschaduwet. Toch zijn die positieve effecten wel degelijk aanwezig (de Bruijn, 2025). De reistijdbetrouwbaarheid is toegenomen in zowel de ideale als de realistische variant, met uitzondering van het eerdergenoemde knelpunt. Door het verwijderen van de gelijkvloerse voorrangskruisingen is de variabele stoptijd op de route A15 West → N57 verdwenen. De directere verbindingen en bijbehorende hogere ontwerpsnelheid dragen daarnaast bij aan kortere reistijden. Verder lijken de te korte turbulentieafstanden volgens de Richtlijnen Ontwerp Autosnelwegen (ROA) bij deze verkeersintensiteiten geen doorstromingsproblemen te veroorzaken in de ideale variant (de Bruijn, 2025). Wel dient dit aspect in vervolgonderzoek verder te worden onderzocht om te beoordelen of deze afstanden in de praktijk, met menselijk rijgedrag, ook geen problemen opleveren.

Volgens de verkeersadviseur zouden de te korte turbulentieafstanden in vervolgfases van het ontwerp via iteratieslagen worden opgelost. In Hoofdstuk 11 is dat in binnen dit onderzoek reeds gelukt bij discontinuïteit 2-i, waar een verplaatsing heeft geleid tot vermindering van filevorming in de ideale ontwerp variant.

De betrouwbaarheid van een microsimulatie hangt sterk samen met de kalibratie van het model. Voor toekomstige ontwerpen is geen referentie beschikbaar, maar in dit onderzoek is het model goed gekalibreerd op het huidige ontwerp met actuele verkeersintensiteiten. Dit vormt volgens de verkeersadviseur een solide basis voor het vergelijken van toekomstige ontwerpen. Ten opzichte van dit gekalibreerde model zijn uitsluitend de verkeersintensiteiten aangepast. Positief is dat de microsimulatie het hierdoor mogelijk maakt om reistijden en snelheden van toekomstige ontwerpen kwantitatief te vergelijken, zodat deze resultaten kunnen worden meegenomen bij de onderbouwing in het wegontwerpproces (de Bruijn, 2025).

De microsimulatie biedt waardevolle inzichten in de doorstromingsaspecten en maakt het mogelijk om knelpunten te identificeren. Een goed voorbeeld is de initiële filevorming in het ideale ontwerp, die kon worden opgelost door discontinuïteit 2-i verder stroomopwaarts te verplaatsen. De effecten van deze aanpassing waren direct zichtbaar in de simulatie, wat volgens de verkeersadviseur van grote waarde is bij het maken van ontwerpkeuzes.

Tegelijkertijd kent de microsimulatie duidelijke beperkingen, die bij het interpreteren van de resultaten niet over het hoofd mogen worden gezien. Paramics houdt geen rekening met omstandigheden die het zicht van bestuurders beperken, zoals slecht weer, nachtelijke uren of beperkt wegverloopzicht in bochten. Hierdoor kunnen hierover geen uitspraken worden gedaan op basis van de simulatie, wat vervolgonderzoek noodzakelijk maakt (de Bruijn, 2025).

Daarnaast laadt Paramics niet alle voertuigen van de gewenste intensiteit in het model wanneer het model vanwege file als vol wordt beschouwd. In het geval van de realistische variant is echter duidelijk dat de congestie optreedt op de verbindingsweg Thomassentunnel → N57 en op de A15 Oost. Het is logisch dat hierdoor niet alle voertuigen worden ingeladen en dit effect is zichtbaar in de resultaten (de Bruijn, 2025). Wel moet worden meegenomen dat de niet-ingeladen voertuigen zich in werkelijkheid wel op het wegennet bevinden, wat mogelijk kan leiden tot extra filevorming buiten het gemodelleerde gebied.

Deze evaluatie laat zien dat microsimulaties, mits goed gekalibreerd, een betrouwbaar en toepasbaar hulpmiddel zijn binnen het wegontwerpproces. Ze maken het mogelijk om knelpunten in doorstroming tijdig te signaleren en de effecten van ontwerpconcessies in kaart te brengen. Tegelijkertijd is het essentieel om de beperkingen van het model in acht te nemen, zodat de interpretatie van de resultaten realistisch en bruikbaar blijft.

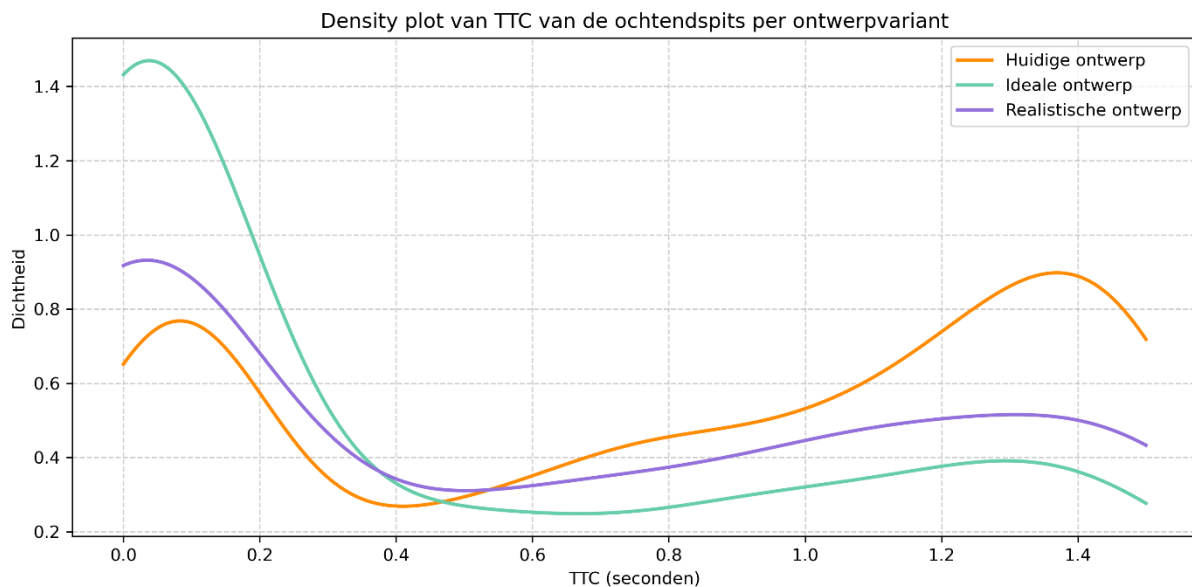
De doorstromingsaspecten zijn in dit onderzoek door één expert beoordeeld. Hoewel deze verkeersadviseur over veel relevante kennis beschikt, wordt aanbevolen om in vervolgonderzoek meerdere experts te betrekken om de betrouwbaarheid van de resultaten te vergroten.

12.2 Evaluatie verkeersveiligheidsaspecten

De verkeersveiligheidsaspecten van de verschillende ontwerpvarianten zijn geanalyseerd met behulp van de software SSAM (Surrogate Safety Assessment Model). Dit programma voert automatisch een conflictenanalyse uit op basis van de voertuigtrajecten die voortkomen uit de microsimulaties in Paramics. Volgens verkeersveiligheidsadviseurs Geert Visser en Sarah de Jong, beiden werkzaam bij Rijkswaterstaat, bemoeilijkt deze automatische conflictenanalyse het beoordelen van de betrouwbaarheid van de resultaten.

De eerste reden hiervoor is dat SSAM aanzienlijk meer conflicten genereert dan op basis van historische ongevallendata te verwachten is (Visser & de Jong, 2025). In de afgelopen elf jaar deden zich 39 daadwerkelijke ongevallen voor (VIA - Rijkswaterstaat, 2024), terwijl SSAM in één enkele ochtend- of avondspits van twee uur tussen de 310 en 24.600 conflicten voorspelt. Dit roept vragen op over wat SSAM precies definieert als een conflict.

SSAM beschouwt iedere interactie tussen twee voertuigen met een Time To Collision (TTC) kleiner dan 1,5 als een mogelijk conflict (U.S. Department of Transportation, z.d.). In Figuur 48 zijn dichtheidsgrafieken weergegeven van de TTC-waarden voor de verschillende ontwerpvarianten tijdens de ochtendspits. De grafieken van de avondspits zijn te vinden in Bijlage 28. Hieruit blijkt dat de TTC-waarden tijdens de ochtendspits vaker tussen 0 en 0,5 liggen, met een lichte toename bij waarden boven de 1,0. Tijdens de avondspits verschuift de verdeling sterker richting waarden onder de 0,2, terwijl minder waarden boven de 0,4 worden waargenomen.



Figuur 48: Dichtheidsgrafiek van de verdeling van de TTC-waarde in de ochtendspits voor de drie varianten

Indien de TTC-drempelwaarde wordt aangescherpt van kleiner dan 1,5 naar kleiner dan 0,5 seconden, zal het verwachte aantal conflicten in SSAM afnemen. Volgens de verkeersveiligheidsexperts is dit gerechtvaardigd, omdat veel interacties tussen voertuigen in tijd en ruimte niet tot daadwerkelijke ongevallen leiden. Deze 'near misses' worden in de praktijk vaak voorkomen door het anticiperend en corrigerend vermogen van bestuurders. Dit sluit aan bij het onderzoek van Vasconcelos et al. (2014), waarin dit verschijnsel wordt toegeschreven aan het menselijk gedrag. In Tabel 14 is het aantal conflicten per ontwerpvariant weergegeven voor zowel de ochtend- als avondspits, gebaseerd op TTC-drempelwaarden van kleiner dan 0,5 en kleiner dan 1,5 seconden.

Tabel 14: Overzicht van het verwachte aantal conflicten per variant bij verschillende drempelwaardes in SSAM

Ontwerpvariant	Spitsperiode	Aantal verwachte conflicten volgens SSAM bij:	
		TTC < 0,5	TTC < 1,5
Huidige ontwerp	Ochtendspits	497	1.376
	Avondspits	1.628	2.932
Ideale ontwerp	Ochtendspits	394	591
	Avondspits	739	1.172
Realistische ontwerp	Ochtendspits	171	312
	Avondspits	14.635	24.605

Uit Tabel 14 volgt dat zelfs na aanscherping van de TTC-drempelwaarde het aantal conflicten dat SSAM genereert nog steeds veel hoger ligt dan op basis van historische ongevallendata te verwachten is. Op basis van dit onderzoek naar de ontwerpvarianten van de Harmsenknoop, lijkt SSAM daarom niet geschikt om het aantal conflicten om te zetten naar een betrouwbare inschatting van daadwerkelijke ongevallen (Visser & de Jong, 2025).

Bovendien blijkt, zoals ook in Hoofdstuk 11 werd geconstateerd, dat SSAM moeite heeft met het correct berekenen van conflicten tussen voertuigen in een file. Volgens de experts komt dit mogelijk door de kleinere volgafstanden in fileverkeer.

Hoewel de verkeersveiligheid momenteel op basis van experts wordt beoordeeld, zou het volgens Visser en De Jong waardevol zijn als dit aangevuld kan worden met betrouwbare resultaten uit SSAM. Daarvoor is echter eerst nader onderzoek nodig naar de betrouwbaarheid en representativiteit van de SSAM-resultaten. Deze vervolgonderzoeken zouden zich met name moeten richten op de relatie tussen de door SSAM voorspelde conflicten en de daadwerkelijk geregistreerde ongevallen.

Toch lijkt SSAM in staat om ontwerpvarianten onderling relatief met elkaar te vergelijken. Op basis van het aantal conflicten en bijbehorende veiligheidsparameters, zoals TTC, PET en DeltaS, kan worden geconcludeerd dat de ideale ontwerpvariant veiliger is dan het huidige ontwerp. Lastiger is het om de realistische variant te beoordelen: SSAM voorspelt tijdens de ochtendspits weinig conflicten, maar tijdens de avondspits juist zeer veel (312 versus 24.605). Dit leidt tot een onduidelijk veiligheidsbeeld.

De verkeersveiligheidsadviseurs geven daarnaast aan dat verkeersveiligheid niet alleen wordt bepaald door voertuig-voertuigconflicten, waarop SSAM zich richt. Ook de omgeving, de zichtafstanden, de mentale werklast van de bestuurder en de vergevingsgezindheid van het wegontwerp spelen een essentiële rol (Visser & de Jong, 2025). Aangezien SSAM deze factoren niet meeneemt, blijft een handmatige beoordeling van de verkeersveiligheid door experts noodzakelijk.

Op basis van de kwalitatieve beoordeling van de twee experts lijken in de nieuwe ontwerpen met name de korte turbulentieafstanden, de beperkte zichtafstanden en de hoge werklast voor bestuurders de belangrijkste knelpunten op het gebied van verkeersveiligheid. Anderzijds zijn deze aspecten in het huidige ontwerp ook niet optimaal. Dit zou volgens Visser en De Jong een reden kunnen zijn om kritisch te kijken naar de noodzaak om alle tien de verkeersstromen op de Harmsenknoop te accommoderen.

De veiligheidsexperts adviseren daarom de volgende vervolgonderzoeken:

- Onderzoek naar het zicht van bestuurders in bochten, inclusief het zicht voor invoegend verkeer op potentiële ruimten in de doorgaande verkeersstroom;
- Onderzoek naar de mentale werklast van bestuurders bij het uitvoeren van de rijtaak;
- Onderzoek naar de gevolgen van brugopeningen van de Calandbrug. In de nieuwe ontwerpen lijkt minder ruimte beschikbaar voor wachtend verkeer op de verbindingswegen, waardoor wachtrijen zich mogelijk buiten het gemodelleerde gebied ontwikkelen.

Tot slot stellen de experts dat het efficiënter is om eerst de doorstromingsproblemen in de ontwerpvarianten op te lossen voordat een definitief oordeel over de verkeersveiligheid wordt gegeven. Doorstromingsproblemen vergroten namelijk de kans op kop-staartbotsingen (Visser & de Jong, 2025).

Uit de analyse blijkt dat SSAM relatieve inzichten kan bieden in de verkeersveiligheid van ontwerpvarianten, maar dat de absolute betrouwbaarheid van de resultaten beperkt is. De methode houdt geen rekening met belangrijke aspecten zoals zicht, mentale werklast en filegedrag, waardoor expertbeoordeling onmisbaar blijft. Verdere ontwikkeling en toetsing van SSAM zijn nodig voordat het toegepast kan worden binnen het wegontwerpproces.

De verkeersveiligheidsaspecten zijn in dit onderzoek door twee experts beoordeeld. Hoewel deze verkeersveiligheidsadviseurs over veel relevante kennis beschikken, wordt aanbevolen om in vervolgonderzoek meerdere experts te betrekken om de betrouwbaarheid van de resultaten te vergroten.

12.3 Evaluatie van de ontwerpvarianten

Op basis van de evaluatie van de ontwerpen met experts en de Richtlijnen Ontwerp Autosnelwegen (ROA) wordt in deze paragraaf een overzicht gegeven van de voor- en nadelen van de drie ontwerpvarianten (huidig, ideaal en realistisch). Per variant worden de belangrijkste punten opgesomd, terwijl in Bijlage 29 de belangrijkste ontwerpaspecten overzichtelijk onder elkaar zijn weergegeven ter vergelijking.

12.3.1 Huidige ontwerp

Voordelen:

- Vereist geen infrastructurele aanpassingen of extra ruimtebeslag;
- Bevat een grotere afstand tussen de Thomassentunnel, de uitvoering op de A15 Oost en de bocht richting de N57, waardoor het verkeer tussentijds kan stabiliseren en files (bijna) niet terugslaan op de A15 en in de Thomassentunnel.

Nadelen:

- Scherpe bochten veroorzaken grote remvertragingen en risico's voor de verkeersveiligheid;
- Twee voorrangskruisingen op de route A15 West → N57 leiden tot lange stoptijden en mogelijk verkeersonveilige situaties;
- Indirecte verbindingen op de routes N57 ↔ Thomassentunnel veroorzaken in de spits doorstromingsproblemen;
- Niet toekomstbestendig met de verwachte toename van de verkeersintensiteiten in 2040.

12.3.2 Ideaal ontwerp

Voordelen:

- Beste prestaties in microsimulaties voor zowel doorstroming als verkeersveiligheid;
- Directe verbindingen op de routes N57 ↔ Thomassentunnel hebben een ruimere boogstraal (160 m) en hogere ontwerpsnelheid (70 km/h) dan de andere varianten;
- Indirecte verbindingswegen zijn met ongelijkvloerse kruisingen gepositioneerd rondom de hoofdverbindingen;
- Minder knelpunten tijdens spitsperioden.

Nadelen:

- Vereist meer ruimte en ingrijpende aanpassingen, waaronder het 1,15 meter verlagen van de Havenspoorlijn;
- Vereist de realisatie van meerdere ongelijkvloerse kruisingen, waaronder één met drie verbindingen boven elkaar;
- Hogere kosten en complexere uitvoering door kunstwerken en benodigde hoogteverschillen;
- Vereist het verwijderen van de aansluiting met de Moezelweg, waardoor bestemmingsverkeer moet omrijden.

12.3.3 Realistisch ontwerp

Voordelen:

- Vereist geen verlaging van de Havenspoorlijn of een ongelijkvloerse kruising met drie verbindingswegen boven elkaar;
- Over het algemeen betere prestaties dan het huidige ontwerp, vooral in de ochtendspits (67% reistijdwinst);
- Minder ingrijpende infrastructurele ingrepen nodig dan bij het ideale ontwerp;
- Indirecte verbindingswegen zijn met minder ongelijkvloerse kruisingen dan in het ideale ontwerp gepositioneerd rondom de hoofdverbindingen.

Nadelen:

- Krappere boogstraal (80 m) en lagere ontwerpsnelheid (50 km/h) op de routes N57 ↔ Thomassentunnel veroorzaken capaciteitsproblemen;
- Filevorming op de route N57 → Thomassentunnel loopt terug tot in de tunnel en vertraagt het verkeer op de route Thomassentunnel → A15 West;
- Forse toename van reistijdverliesuren in de avondspits (+753% ten opzichte van huidig ontwerp);
- Vereist het verwijderen van de aansluiting met de Moezelweg, waardoor bestemmingsverkeer moet omrijden.

12.3.4 Keuze tot uiteindelijke variant

Hoewel het opsommen van de voor- en nadelen van de varianten uitnodigt om één variant te kiezen, wordt deze keuze in dit onderzoek niet gemaakt. De reden hiervoor is dat in dit onderzoek niet alle benodigde aspecten voor deze beslissing zijn meegenomen. Zo is geen kostenraming opgesteld, blijkt uit het microsimulatie onderzoek en de evaluatie met de experts dat niet alle verkeersveiligheidsaspecten zijn meegenomen en is in dit onderzoek alleen gekeken naar de eerste fasen van het wegontwerpproces. Aspecten zoals de turbulentieafstanden, filevorming in de Thomassentunnel, werklast van de bestuurder en zichtlijnen dienen eerst nader te worden onderzocht voordat een definitieve keuze voor één van de varianten kan worden gemaakt.

12.4 Evaluatie van de inzet van microsimulatie voor doorstroming en veiligheid

De drie ontwerpvarianten (huidig, ideaal en realistisch ontwerp) zijn geanalyseerd met microsimulaties om de doorstromings- en verkeersveiligheidsaspecten van de ontwerpvarianten in kaart te brengen en om te onderzoeken in hoeverre microsimulaties deze effecten realistisch en gedetailleerd kunnen weergeven. Hiermee wordt bijgedragen aan de wetenschappelijke kennis over de inzet van microsimulaties als alternatief of aanvulling op expertbeoordelingen bij het maken van keuzes binnen het wegontwerpproces.

De resultaten van dit onderzoek laten zien dat microsimulaties effectief zijn in het identificeren van zowel de sterke punten als knelpunten in de ontwerpvarianten. Filevorming en de achterliggende oorzaken worden visueel inzichtelijk gemaakt, waardoor gerichte acties voor het verbeteren van het ontwerp sneller kunnen worden bepaald en kansrijke varianten eerder in het ontwerpproces naar voren komen. De beoordeling van verkeersveiligheid met microsimulaties blijkt echter nog te beperkt, waardoor expertkennis voorlopig essentieel blijft voor een volledige veiligheidsanalyse.

Omdat het belangrijk is de mogelijkheden en beperkingen van microsimulaties in acht te nemen, is op basis van dit onderzoek een overzicht opgesteld van de sterke en zwakke punten van de gebruikte simulaties. Daarbij is gekeken naar zowel de aspecten die goed worden meegenomen als naar de punten waarop de simulatie minder geschikt is.

Sterke punten:

- Paramics modelleert bochten als gekromde wegvakken met een bijbehorende boogstraal;
- Paramics past het voertuiggedrag aan op basis van de boogstraal en het hellingspercentage;
- Paramics genereert voor elke simulatie-run gegevens in een uniform formaat;
- Paramics kan goed gekalibreerd worden op basis van actuele verkeersintensiteiten;
- Paramics genereert voertuigtrajecten, die voor de analyse van SSAM gebruikt kunnen worden;
- Paramics biedt gedetailleerde inzichten in doorstromingsaspecten, zoals reistijden, snelheden en knelpunten (bijvoorbeeld filevorming bij de verbindingsweg Thomassentunnel → N57);
- Paramics maakt het mogelijk om ontwerpvarianten kwantitatief te vergelijken, wat helpt bij het onderbouwen van ontwerpkeuzes;

- Aanpassingen in het ontwerp (zoals het verplaatsen van discontinuïteiten) zijn direct zichtbaar in de simulatie-uitkomsten van Paramics, wat de iteratieve ontwerpfasen ondersteunt;
- De software SSAM maakt automatische conflictanalyses mogelijk, wat een eerste indicatie geeft van verkeersveiligheid en het mogelijk maakt om ontwerpvarianten onderling te vergelijken.

Zwakke punten:

- Paramics houdt geen rekening met zichtbeperkingen door obstakels, weersomstandigheden of nachtelijke situaties;
- Tunneleigenschappen kunnen niet in Paramics worden ingevoerd, waardoor het geen rekening houdt met de aangepaste omstandigheden of het rijgedrag in tunnels;
- Het invoeggedrag van voertuigen in Paramics is niet optimaal, omdat de voertuigen direct na het puntstuk invoegen zonder gebruik te maken van overige lengte van de invoegstrook. Dit kan redelijkerwijs worden gecorrigeerd door voertuigen in het model na het puntstuk verplicht een aantal meter dezelfde rijstrook te laten volgen;
- Paramics laadt niet alle voertuigen in wanneer het model als vol wordt beschouwd, wat gevolgen kan hebben voor de representativiteit van de resultaten, vooral bij filevorming;
- SSAM genereert substantieel meer conflicten dan op basis van historische ongevallen te verwachten is, wat de betrouwbaarheid van absolute veiligheidsinschattingen beperkt;
- SSAM lijkt conflicten in files (door kleinere volgafstanden) niet goed te kunnen voorspellen, wat kan leiden tot een overschatting van conflicten en een foutieve categorisering van conflicten in die situaties;
- SSAM kijkt enkel naar voertuig-voertuigconflicten en niet naar enkelzijdige conflicten met bijvoorbeeld de omgeving;
- SSAM houdt geen rekening met de Z-coördinaat (hoogteligging) van voertuigen, waardoor foutieve conflicten kunnen ontstaan, bijvoorbeeld bij ongelijkvloerse kruisingen waar voertuigen zich op verschillende hoogten bevinden;
- Paramics en SSAM houden geen rekening met omgevingsfactoren, werklust van bestuurders, vergevingsgezindheid van het ontwerp en andere kwalitatieve veiligheidsaspecten, waardoor een handmatige expertbeoordeling noodzakelijk blijft.

Samenvattend blijkt dat microsimulaties een waardevol instrument zijn om het ontwerpproces te versnellen, doordat knelpunten en verbeterpunten in ontwerpvarianten vroegtijdig en visueel inzichtelijk worden gemaakt. De mogelijkheid om varianten kwantitatief te vergelijken op reistijden, snelheden en doorstroming maakt het eenvoudiger om kansrijke ontwerpen sneller te selecteren en gerichte verbeteracties te bepalen.

Tegelijkertijd kennen de microsimulatie software Paramics en SSAM duidelijke beperkingen, waardoor de resultaten altijd kritisch moeten worden geïnterpreteerd en waar nodig moeten worden aangevuld met expertkennis en vervolgonderzoek. Vooral de verkeersveiligheidsanalyse met SSAM blijkt nog beperkt door het overschatten van het aantal conflicten en beperkingen bij specifieke verkeerssituaties, waardoor expertkennis voorlopig essentieel blijft voor een volledige veiligheidsbeoordeling.

13. Discussie

In dit hoofdstuk worden de belangrijkste bevindingen van het onderzoek kritisch besproken. Er wordt gereflecteerd op de gemaakte ontwerpkeuzes, de kwaliteit en bruikbaarheid van de gebruikte microsimitaties, en de methodologische beperkingen van het onderzoek. Daarnaast worden de validiteit en generaliseerbaarheid van de resultaten in relatie tot de praktische en beleidsmatige implicaties behandeld. Tot slot worden aanbevelingen gedaan voor vervolgonderzoek.

13.1 Reflectie op de ontwerpkeuzes

Bij het ontwikkelen van het herontwerp voor de Harmsenknoop zijn diverse ontwerpkeuzes gemaakt die invloed hebben op de veiligheid en doorstroming. Ten eerste blijkt dat de gebruikte verkeersdata uit het Nederlands Regionaal Model (NRM) enkele tekortkomingen vertoont, zoals een onnauwkeurige verkeersverdeling over de Calandbrug en Thomassentunnel en een onderschatting van verkeer op de N57. Dit beperkt de betrouwbaarheid van het model en de daaruit volgende ontwerpkeuzes voor de benodigde capaciteit. Hoewel de berekening van de het aantal rijstroken laat zien dat het ontwerp restcapaciteit bevat, is slechts één toekomstscenario onderzocht, wat de robuustheid van de bevindingen beperkt.

In het ideale ontwerp voldoen niet alle turbulentieafstanden aan de richtlijnen, vanwege de beperkte beschikbare ruimte. Dit kan extra risico's opleveren op het gebied van verkeersveiligheid, die nader onderzoek vereisen. Ook zijn de gevolgen van het ontwerp voor aspecten zoals zicht en de werklast van bestuurders niet geëvalueerd en worden deze niet meegenomen in de microsimitaties. Juist bij complexe boogovergangen en discontinuïteiten zijn deze factoren essentieel voor het veilig en comfortabel uitvoeren van de rijtaak.

Daarnaast zijn sommige ontwerpelementen, zoals top- en voetbogen en verkantingsovergang in overgangsbogen, niet volledig uitgewerkt, en is de dimensionering van puntstukken buiten beschouwing gelaten. Het is onduidelijk of deze onderdelen binnen de beschikbare ruimte conform de ontwerprichtlijnen gerealiseerd kunnen worden, wat risico's met zich mee kan brengen voor de praktische uitvoerbaarheid en het rijcomfort.

In de realistische ontwerpvariant wordt bij discontinuïteit 3-u de splitsing naar 2+2 rijstroken vrijwel direct gevolgd door een splitsing naar 1+1 rijstroken. Dit kan in de praktijk leiden tot verhoogde verkeersveiligheidsrisico's en mogelijke doorstromingsproblemen. Toch lieten de microsimitaties op het eerste gezicht geen knelpunten op dit punt zien.

Deze aandachtspunten tonen aan dat het ontwerp, hoewel het op veel vlakken zorgvuldig is uitgewerkt, op enkele onderdelen nog nadere uitwerking behoeft. Dit zijn met name de aspecten die buiten het bereik van de microsimitatie vallen of waarvoor aanvullende detailontwerpen noodzakelijk zijn.

13.2 Kwaliteit en bruikbaarheid van microsimitaties

In dit onderzoek zijn microsimitaties toegepast om inzicht te verkrijgen in de doorstromings- en verkeersveiligheidsaspecten van de verschillende ontwerpconcessies en -varianten. Hiervoor zijn de microsimitatie software Paramics en het veiligheidsanalysemodel SSAM (Surrogate Safety Assessment Model) gebruikt. Hoewel deze modellen waardevolle informatie opleveren voor het identificeren van zowel de sterke punten als knelpunten in de ontwerpen, zijn in dit onderzoek ook duidelijke beperkingen en onzekerheden vastgesteld.

Een eerste beperking betreft de betrouwbaarheid en kalibratie van de microsimitaties. De resultaten zijn gebaseerd op tien simulaties-runs per variant, wat weliswaar relatief beperkt is, maar in Hoofdstuk 10 is aangetoond dat hiermee voor het aantal voertuigen, de reistijd en de snelheid afzonderlijk een betrouwbaarheidsinterval van 95% wordt bereikt. Tegelijkertijd moet worden opgemerkt dat het

betrouwbaarheidsinterval van de drie doorstromingsaspecten samen (gemiddelde betrouwbaarheid) niet nader is onderzocht. Daarnaast is het model in Paramics gekalibreerd op basis van beschikbare actuele verkeersintensiteiten en voldeed het aan de significantietoets. Echter was geen gedetailleerde snelheids- en voertuiggedragsdata van het huidige verkeersbeeld op de Harmsenknoop beschikbaar. Dit vergroot de onzekerheid van absolute modeluitkomsten en benadrukt het belang van aanvullende validatie bij toepassing in het ontwerpproces.

Ook bij de veiligheidsanalyse met SSAM zijn inhoudelijke beperkingen vastgesteld. Zo houdt het model geen rekening met de Z-coördinaat (hoogteligging), waardoor het geen onderscheid maakt tussen ongelijkvloerse kruisingen en aansluitingen op verschillende niveaus. Dit kan leiden tot het ontbreken van signaleren van conflicten die in de praktijk niet mogelijk zijn, bijvoorbeeld bij viaducten. Daarnaast lijkt de verdeling van de conflicttypen op de snelweg in dit onderzoek niet realistisch: het aandeel kruisingsconflicten is opvallend hoog, terwijl dergelijke situaties op snelwegen zelden voorkomen door het gebruik van ongelijkvloerse aansluitingen. Vooral tussen voertuigen in filecondities verwacht SSAM relatief veel (kruisings)conflicten, wat erop kan wijzen dat het model moeite heeft met het interpreteren van kleine volgafstanden. Een mogelijke verbetering zou zijn om de drempelwaarden voor de Time To Collision (TTC) en de grenswaarden voor conflicthoeken aan te passen aan de context van autosnelwegverkeer. Dit vereist echter nader onderzoek.

Verder is het onbekend in hoeverre de verwachte conflicten uit SSAM daadwerkelijk leiden tot ongevallen. SSAM maakt gebruik van veiligheidsparameters, zoals TTC, PET (Post-Encroachment Time) en DeltaS (snelheidsverschil), maar een directe en betrouwbare relatie met ongevalsdata is niet vastgesteld. Dit betekent dat de resultaten vooral bruikbaar zijn voor de relatieve vergelijking tussen ontwerpvarianten, maar niet geschikt zijn om absolute uitspraken over verkeersveiligheid te doen.

Tot slot is vastgesteld dat specifiek rijgedrag in tunnels, zoals snelheidsaanpassing bij in- en uitritten, in Paramics niet wordt meegenomen. Dit kan gevolgen hebben voor de nauwkeurigheid van voorspellingen rond de Thomassentunnel, vooral onder fileomstandigheden.

Samenvattend bieden Paramics en SSAM waardevolle inzichten in de effecten van ontwerpkeuzes op doorstroming en verkeersveiligheid, doordat knelpunten vroegtijdig zichtbaar worden en varianten kwantitatief kunnen worden vergeleken. Tegelijkertijd kennen beide modellen beperkingen, met name bij de verkeersveiligheidsanalyse van SSAM, waardoor resultaten altijd kritisch moeten worden geïnterpreteerd en zo nodig worden aangevuld met expertkennis en vervolgonderzoek.

13.3 Methodologische beperkingen van het onderzoek

Hoewel dit onderzoek zorgvuldig is uitgevoerd op basis van de eerste fasen van het Kader Wegontwerpproces van Rijkswaterstaat, brengt de gekozen afbakening in combinatie met de gehanteerde randvoorwaarden en de toevoeging van microsimulaties enkele methodologische beperkingen met zich mee. Deze moeten bij de interpretatie van de resultaten in acht worden genomen.

Allereerst zorgt het opstellen van ruimtelijke randvoorwaarden voorafgaand aan het Functioneel en Elementair Ontwerp ervoor dat ook de ideale ontwerpvariant binnen beperkingen is vormgegeven. In het Kader Wegontwerpproces wordt het ideale ontwerp normaliter zonder deze beperkingen volledig conform de richtlijnen opgesteld. De gekozen methode maakte het mogelijk om binnen de beperkte tijd tot ontwerpvarianten te komen die binnen de beschikbare ruimte gerealiseerd kunnen worden, doordat ideeën die niet binnen de randvoorwaarden passen direct konden worden afgewezen. Het is echter mogelijk dat een ontwerpproces zonder vooraf vastgestelde ruimtelijke kaders tot een ander ideaal ontwerp had geleid dan de in dit onderzoek gepresenteerde variant. Daarnaast zijn de randvoorwaarden in dit onderzoek onderverdeeld in harde en bespreekbare randvoorwaarden. Het

blijft echter de vraag of een harde randvoorwaarde in de praktijk echt onwrikbaar is, bijvoorbeeld bij druk vanuit de politiek of maatschappij.

Verder is in dit onderzoek, aanvullend op de verkennende fasen van het Kader, een analyse met microsimulaties uitgevoerd. Dit maakte het mogelijk om de ontwerpvarianten systematisch te toetsen op doorstroming en verkeersveiligheid zonder directe afhankelijkheid van de beoordeling van experts. Daarnaast blijkt dat microsimulaties een waardevol instrument zijn om het ontwerpproces te versnellen, doordat knelpunten en verbeterpunten in ontwerpvarianten vroegtijdig en visueel inzichtelijk worden gemaakt. De mogelijkheid om varianten kwantitatief te vergelijken op reistijden, snelheden en doorstroming maakt het eenvoudiger om kansrijke ontwerpen sneller te selecteren en gerichte verbeteracties te bepalen. Desondanks moeten de uitkomsten echter kritisch worden geïnterpreteerd en eventueel worden aangevuld met expertkennis en vervolgonderzoek.

Vanwege de scope van dit onderzoek zijn de microsimulaties beperkt tot de directe omgeving van de Harmsenknoop. Hierdoor blijven mogelijke effecten op het omliggende wegennet en bredere netwerkdynamiek buiten beschouwing. Dit kan de inschatting van effecten op doorstroming en verkeersveiligheid beïnvloeden, zeker in een situatie waarin het onderliggende wegennet verandert of andere verbindingen, zoals de Blankenburgverbinding, een grotere rol gaan spelen.

Verder is slechts één toekomstscenario voor 2040 onderzocht, waardoor de robuustheid van de bevindingen bij variërende toekomstige ontwikkelingen niet is getoetst. Het gebruik van meerdere scenario's zou dit kunnen verbeteren.

Tot slot is, zoals in de vorige paragraaf is toegelicht, de interpretatie van SSAM-resultaten beperkt door de onzekere relatie tussen gesimuleerde conflicten en daadwerkelijke ongevallen.

Deze methodologische overwegingen onderstrepen dat de resultaten vooral als richtinggevend moeten worden beschouwd, in plaats van als absolute voorspellingen.

13.4 Validiteit, generaliseerbaarheid en implicaties voor praktijk en beleid

De resultaten van dit onderzoek geven waardevolle inzichten in de effecten van ontwerpkeuzes op doorstroming en verkeersveiligheid, maar moeten in de context van de gehanteerde aannames en modelbeperkingen zorgvuldig worden geïnterpreteerd. Door de beperking tot één toekomstscenario en een afgebakend deel van het netwerk is de generaliseerbaarheid van de uitkomsten beperkt. Daarnaast is de betrouwbaarheid van de gebruikte modellen afhankelijk van de kwaliteit van de invoerdata en de kalibratie, waardoor absolute uitspraken over prestaties voorzichtig moeten worden geïnterpreteerd.

Desondanks laat het onderzoek zien hoe microsimulaties ingezet kunnen worden om ontwerpvarianten vroegtijdig te toetsen. Dit biedt praktische meerwaarde voor ontwerpers en beleidsmakers, mits de resultaten worden aangevuld met specialistische analyses, verdere ontwerputwerking en toetsing aan beleidsdoelen. Daarmee kan het onderzoek bijdragen aan een goed onderbouwde vervolgstap in het besluitvormings- en wegontwerpproces.

13.5 Aanbevelingen en aandachtspunten voor vervolgonderzoek

Op basis van de bevindingen van dit onderzoek, het detailniveau van de opgestelde ontwerpen en de beperkingen in de microsimulaties biedt dit onderzoek vooral een eerste verkenning van de prestaties van de herontwerpen voor de Harmsenknoop. Vervolgonderzoek is noodzakelijk om verschillende aspecten verder uit te werken, de betrouwbaarheid van de uitkomsten te vergroten en de tekortkomingen in de gebruikte modellen in Paramics en SSAM te verminderen. Dit geldt zowel voor inhoudelijke aanvullingen op het ontwerp als voor een bredere toetsing van effecten op verkeersveiligheid, doorstroming en uitvoerbaarheid.

De volgende vervolgonderzoeken en aandachtspunten worden aanbevolen:

Wegontwerp:

- Het verder uitwerken van het ontwerp volgens de vervolgstappen van het Kader Wegontwerpproces van Rijkswaterstaat, zodat ook elementen zoals puntstukken, verkantingsovergangen, top- en voetbogen en zichtafstanden volledig worden uitgewerkt.
- Het onderzoeken van de gevolgen van ontoereikende turbulentieafstanden voor de doorstroming en verkeersveiligheid, waarbij ook gekeken wordt naar de bijbehorende werklust van de bestuurder en het rijgedrag nabij de Thomassentunnel.
- Het nader onderzoeken van de verwachte verkeersintensiteiten in 2040 of latere jaren, waarbij gebruikt wordt gemaakt van meerdere scenario's, bijvoorbeeld op basis van verschillende economische en ruimtelijke ontwikkelingen.
- Het analyseren van de impact van brugopeningen van de Calandbrug (en eventueel de Harmsenbrug) op de doorstroming in het nieuwe ontwerp.
- Het verkennen van mogelijkheden om het ontwerp gefaseerd te realiseren, waarbij het doorgaand verkeer zoveel mogelijk moet kunnen blijven rijden tijdens de bouw.
- Het onderzoeken van de effecten van het eventueel verlagen van de wegcategorie van de N57. Dit kan bijvoorbeeld gelijkvloerse kruisingen mogelijk maken en de aansluiting op het omliggende wegennet verbeteren.

Microsimulaties:

- Het uitbreiden van het gesimuleerde gebied, zodat ook netwerkeffecten van omliggende wegen en alternatieve routes kunnen worden meegenomen.
- Het bestuderen van de gevolgen van het volledig laten uitlopen van de simulatie tot alle voertuigen zijn afgewikkeld, zodat beoordeeld kan worden of dit leidt tot betrouwbaardere uitkomsten.
- Het combineren van verschillende microsimulatie software om aanvullende aspecten zoals zichtafstanden, de werklust van de bestuurder en het rijgedrag bij tunnels inzichtelijk te maken.
- Het analyseren van het effect van het ontbreken van een Z-coördinaat in SSAM, waarbij met name wordt onderzocht of conflicten bij ongelijkvloerse kruisingen correct worden gedetecteerd.
- Het verder analyseren van de relatie tussen conflicten in SSAM en daadwerkelijke ongevallen, om de bruikbaarheid van SSAM-resultaten te verbeteren.
- Het onderzoeken van de mogelijkheid om SSAM te kalibreren voor snelwegen, zodat de mogelijk foutieve toewijzing van conflicttypen wordt verholpen door bijvoorbeeld drempelwaarden en conflictparameters aan te passen.

Doorstroming en netwerkeffecten:

- Het evalueren van de doorstromingsaspecten van de ontwerpvarianten en de microsimulaties door meerdere experts, bij voorkeur uit verschillende organisaties.
- Het onderzoeken van de effecten op het omliggende wegennet door het verwijderen van de aansluiting met de Moezelweg, inclusief de mogelijke verplaatsing van verkeersstromen en de vorming van nieuwe knelpunten op andere locaties.
- Het onderzoeken of de berekende omrijfactoren, als gevolg van het verwijderen van de aansluiting met de Moezelweg, binnen de acceptabele grenzen van Rijkswaterstaat vallen.

Verkeersveiligheid:

- Het evalueren van de verkeersveiligheidsaspecten van de ontwerpvarianten en de microsimulaties door meerdere experts, bij voorkeur uit verschillende organisaties.
- Het nader onderzoeken van de verkeersveiligheid van de ontwerpvarianten, inclusief het identificeren van aspecten die verdere analyse vereisen.
- Het uitvoeren van een verdiepende analyse naar de risico's van vrachtverkeer met gevaarlijke stoffen op de Harmsenknoop, inclusief mogelijke aanvullende veiligheidsmaatregelen.

Overige aspecten:

- Het uitvoeren van een kosten-batenanalyse om te bepalen binnen welk tijdsbestek de hogere aanlegkosten van de ideale variant worden terugverdiend via reistijdwinst en mogelijk minder ongevallen ten opzichte van het huidige en realistische ontwerp.
- Het onderzoeken van de richtlijnen van de tunnelstandaard voor de Thomassentunnel om vast te stellen of en in welke mate filevorming in de tunnel is toegestaan.
- Het in kaart brengen van de gevolgen van het uitsluiten van landbouwverkeer op de Harmsenknoop, inclusief de impact op huidige routes en omreisafstanden.

14. Conclusie

De Nederlandse snelwegen staan onder druk door toenemende verkeersintensiteit, verouderde infrastructuur en beperkte fysieke ruimte (Rijkswaterstaat, 2025). Vooral bij knooppunten leidt dit tot uitdagingen in het realiseren van veilige en toekomstbestendige ontwerpen. In dit onderzoek is, aan de hand van het ontwikkelen van een herontwerp voor de Harmsenknoop, verkend hoe ontwerpconcessies invloed hebben op verkeersveiligheid en doorstroming. Daarbij is gebruikgemaakt van microsimitaties om te beoordelen in hoeverre deze simulaties kunnen bijdragen aan het inzichtelijk maken van doorstromings- en verkeersveiligheidsaspecten van de ontwerpvarianten.

Om de doelstellingen van dit onderzoek te bereiken, is het Kader Wegontwerpproces van Rijkswaterstaat als basis gehanteerd en zijn extra stappen voor de microsimitatie aan de methode toegevoegd. Daarnaast zijn uit de elementaire ontwerpcyclus de stappen probleemanalyse en het opstellen van randvoorwaarden en eisen toegevoegd, zodat het kader van Rijkswaterstaat wordt gecombineerd met de ontwerpcyclus uit de academische sector.

Het toevoegen van de probleemanalyse heeft bijgedragen aan het afbakenen en scherpstellen van de belangrijkste aspecten en problemen die met het nieuwe ontwerp van de Harmsenknoop moeten worden opgelost. Het opstellen van de eisen en randvoorwaarden voorafgaand aan het Functioneel en Elementair Ontwerp maakte het mogelijk om binnen de beperkte tijd tot ontwerpvarianten te komen die binnen de beschikbare ruimte gerealiseerd kunnen worden, doordat ideeën die niet binnen de randvoorwaarden pasten direct konden worden afgewezen. Hierbij is het essentieel dat in het programma van eisen duidelijk staat welke aspecten onmisbaar zijn in het ontwerp, zodat het eindresultaat aansluit bij de verwachtingen.

De gevolgde methode heeft geleid tot een gestructureerd ontwerpproces, waarbij knelpunten in de Harmsenknoop vroegtijdig konden worden geïdentificeerd en haalbare ontwerpvarianten efficiënt konden worden ontwikkeld. Door het combineren van het Kader Wegontwerpproces met de elementaire ontwerpcyclus uit de academische sector konden meerdere ontwerpopties snel worden getoetst aan de randvoorwaarden en eisen. Microsimitaties maakten het mogelijk de prestaties van de varianten op doorstroming en verkeersveiligheid inzichtelijk te maken, hoewel de resultaten altijd kritisch moeten worden geïnterpreteerd en waar nodig aangevuld met expertkennis.

Hiermee is een solide basis gelegd voor het beantwoorden van de twee doelstellingen van dit onderzoek, waarvan de eerste is geformuleerd als:

Het ontwikkelen van een eerste ontwerpvoorstel voor een veilig en toekomstbestendig herontwerp van de Harmsenknoop.

Op basis van de knelpunten in het huidige ontwerp, de uitgangspuntennotitie en het programma van eisen zijn twee nieuwe ontwerpen ontwikkeld voor de Harmsenknoop: de ideale ontwerpvariant en de realistische variant.

In de ideale ontwerpvariant worden directe verbindingswegen met een ontwerpsnelheid van 70 km/h tussen de Thomassentunnel en de N57 gecreëerd en worden de overige verbindingswegen efficiënt aangesloten. Daarnaast zijn alle tegengestelde rijrichtingen van elkaar gescheiden en worden de kruisingen op ongelijkvloerse hoogten gerealiseerd. De ideale variant presteert in de microsimitaties het best op zowel verkeersveiligheid als doorstroming, maar vraagt meer ruimte en vereist een ongelijkvloerse kruising met de Havenspoorlijn.

In de realistische ontwerpvariant worden twee concessies doorgevoerd, zodat deze variant beter aansluit bij de ruimtelijke context door de knelpunten uit te knelpuntenanalyse te vermijden. Dit maakt het mogelijk dat in de realistische variant de (verticale) ligging van de Havenspoorlijn wordt behouden

en dat een ongelijkvloerse kruising met drie verbindingswegen boven elkaar wordt voorkomen. De eerste concessie ten opzichte van het ideale ontwerp is dat de boogstraal van de verbindingswegen tussen de Thomassentunnel en N57 wordt verkleind, waardoor de ontwerpsnelheid volgens de Richtlijnen Ontwerp Autosnelwegen (ROA) moet worden verlaagd naar 50 km/h. Hierdoor komen deze verbindingswegen niet meer boven de Havenspoorlijn uit. De tweede concessie is het verleggen van de verbindingsweg N57 → A15 West, zodat wordt voorkomen dat drie verbindingswegen boven elkaar worden gerealiseerd bij ongelijkvloerse kruising 1.

Hoewel de realistische variant in de microsimitaties over het algemeen beter presteert dan het huidige ontwerp, kent deze variant een knelpunt in de avondspits. De verbindingsweg Thomassentunnel → N57 heeft met de krappere boogstraal en lagere ontwerpsnelheid onvoldoende capaciteit, waardoor file ontstaat die terugloopt tot in de Thomassentunnel.

In beide ontwerpvarianten is gekozen om de bestaande aansluiting met de Moezelweg te verwijderen om tot een efficiënter en compacter ontwerp te komen. Deze ingreep draagt bij aan een verbeterde doorstroming, maar heeft ook consequenties voor de bereikbaarheid van het onderliggend wegennet. Het is aan Rijkswaterstaat om in een vervolgtraject af te wegen of het verwijderen van deze aansluiting wenselijk en acceptabel is binnen de bredere beleidsdoelstellingen en belangenafwegingen.

Naast het ontwikkelen van een nieuw ontwerp, richtte dit onderzoek zich op een tweede doelstelling, deze is geformuleerd als:

Het onderzoeken of microsimitaties in staat zijn om de effecten van ontwerpconcessies op het gebied van verkeersveiligheid en doorstroming realistisch en gedetailleerd in kaart te brengen.

De microsimitaties met Paramics en SSAM (Surrogate Safety Assessment Model) hebben waardevolle inzichten opgeleverd in de relatieve prestaties van de ontwerpvarianten. Paramics bleek goed in staat om knelpunten in de doorstroming te identificeren en maakt het mogelijk om kwantitatieve waarden voor reistijden, reistijdverliesuren en snelheden te genereren. SSAM gaf een eerste indicatie van de verkeersveiligheid door het verwachte aantal conflicten te bepalen en deze vervolgens te analyseren met veiligheidsparameters, zoals Time To Collision (TTC), Post-Encroachment Time (PET) en Snelheidsverschil (DeltaS).

De resultaten laten zien dat microsimitaties effectief zijn in het identificeren van zowel de sterke punten als de knelpunten in de ontwerpen. Filevorming en de achterliggende oorzaken worden visueel inzichtelijk gemaakt, waardoor gerichte acties voor het verbeteren van het ontwerp sneller kunnen worden bepaald en kansrijke varianten eerder in het ontwerpproces naar voren komen. De beoordeling van verkeersveiligheid met microsimitaties blijkt echter nog beperkt, waardoor expertkennis voorlopig essentieel blijft voor een volledige veiligheidsanalyse.

Tegelijkertijd zijn duidelijke beperkingen van beide modellen vastgesteld. Zo houden zowel Paramics als SSAM geen rekening met aspecten als zicht en de werklast van de bestuurder. SSAM genereert daarnaast veel meer conflicten dan op basis van ongevalsdata verwacht mag worden en houdt geen rekening met hoogteverschillen en verkeersveiligheidsaspecten uit de omgeving. Verdere ontwikkeling en toetsing van SSAM zijn nodig voordat het toegepast kan worden binnen het wegontwerpproces.

Ondanks deze beperkingen hebben de microsimitaties waardevolle inzichten opgeleverd voor het wegontwerpproces, met name voor de beoordeling van de doorstroming en in beperktere mate voor de verkeersveiligheid. Knelpunten in de ontwerpvarianten worden met microsimitaties vroegtijdig zichtbaar en de varianten kunnen kwantitatief worden vergeleken. De microsimitatie software Paramics en SSAM kennen echter duidelijke beperkingen, waardoor de resultaten altijd kritisch moeten worden geïnterpreteerd en waar nodig moeten worden aangevuld met expertkennis en vervolgonderzoek.

Referenties

- AHN. (z.d.). Actueel Hoogtebestand Nederland. Opgeroepen op juni 2025, van <https://viewer.ahn.nl/AHN4/DTM/0/6.5465/52.26738/3>
- Barceló, J. (2010). *Fundamentals of Traffic Simulations*. doi:<https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6142-6>
- Calvi, A., & et al. (2011, januari 1). Driver Behavior on Acceleration Lanes. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, pp. 96-103. doi:<https://doi.org/10.3141/2248-13>
- CIA - Rijkswaterstaat. (2024). *Capaciteitswaarden Infrastructuur Autosnelwegen*. Opgeroepen op 2025, van <https://standaarden.rws.nl/index.html>
- CROW - Wegontwerp BBK. (2025). *Handboek wegontwerp buiten de bebouwde kom*. Opgeroepen op mei 2025, van <https://kennisbank.crow.nl/kennismodule/publicationdetail/609#117471>
- CROW. (2024). Opgehaald van Kennisbank CROW: <https://kennisbank.crow.nl/kennismodule/detail/17945#14106>
- Da Silva, F. (2014, december 1). Mental Workload, Task Demand and Driving Performance: What Relation? *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, pp. 310-319. doi:<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.12.212>
- de Bruijn, G. (2025, juni 24). Evaluatie van de doorstromingsaspecten van de drie ontwerpen en de microsimulatie. (K. van Dongen, Interviewer)
- de Bruijn, G., & van Rongen, M. (2025, maart 31). Bespreking toekomstige verkeerinsiteiten op de Harmsenknoop op basis van gegevens van het NRM. (K. van Dongen, Interviewer)
- Dijkstra-Vlaardingen, R. (2023). *Luchtfoto van het Hartelkanaal, de Harmsenbrug en de Harmsenknoop*. Opgeroepen op december 9, 2024, van <https://www.ad.nl/rotterdam/geen-windturbines-in-rijnmondgebied-liever-kerncentrale~a130f0c2/>
- Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat. (2004). Technische tekening bovenaanzicht en langsdoorsnede westelijke tunnelmond Thomassentunnel. Opgeroepen op april 2025
- Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat. (2019). Doorsnede landhoofd bestaande Harmsenbrug. Opgeroepen op april 2025
- Eisma, M.-J. (2025, mei 9). Bespreking toekomstige ontwikkelingen rond de Harmsenknoop. (K. van Dongen, Interviewer)
- Farah, H., & et al. (2016, januari 1). Critical Assessment of Methodologies for Operations and Safety Evaluations of Freeway Turbulence. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, pp. 39-48. doi:<https://doi.org/10.3141/2556-05>
- FOSIM. (z.d.). Opgeroepen op mei 2025, van <https://www.fosim.nl/beschrijving-model.shtml>
- Gettman, D., & Shelby, S. (2008). *Surrogate Safety Assessment Model and Validation: Final Report*. Opgehaald van https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/39210/dot_39210_DS1.pdf
- Google Maps. (2025, juli 6). Huidige afstand van de Moezelweg naar de Calandbrug. Opgehaald van https://www.google.nl/maps/@51.9022862,4.2188239,16.5z?entry=ttu&g_ep=EgoyMDI1MDYzMC4wIKXMDSoASAFQAw%3D%3D

- Google Maps. (2025, juli 7). Huidige route van de Calandbrug naar de Moezelweg met bijbehorende afstand. Opgehaald van https://www.google.nl/maps/@51.901747,4.2211683,17.33z?entry=tту&g_ep=EgoyMDI1MDYzMC4wIKXMDSOASAFQAw%3D%3D
- Google Maps. (2025, juli 6). Huidige route van de Moezelweg naar de N57 met bijbehorende afstand. Opgehaald van https://www.google.nl/maps/@51.9038155,4.2112623,16.88z?entry=tту&g_ep=EgoyMDI1MDYzMC4wIKXMDSOASAFQAw%3D%3D
- Google Maps. (2025, juli 6). Huidige route van de N57 naar de Moezelweg met bijbehorende afstand. Opgehaald van https://www.google.nl/maps/@51.9026763,4.2121382,17.75z?entry=tту&g_ep=EgoyMDI1MDYzMC4wIKXMDSOASAFQAw%3D%3D
- Google Maps. (2025, juli 7). Omreisroute van de Calandbrug naar de Moezelweg via de N57 met bijbehorende afstand. Opgehaald van https://www.google.nl/maps/@51.9011429,4.219006,17.08z?entry=tту&g_ep=EgoyMDI1MDYzMC4wIKXMDSOASAFQAw%3D%3D
- Google Maps. (2025, juli 6). Omreisroute van de Moezelweg naar de Calandbrug wanneer de rotonde bij de Moezelweg wordt weggehaald. Opgehaald van https://www.google.nl/maps/@51.9022862,4.2188239,16.5z?entry=tту&g_ep=EgoyMDI1MDYzMC4wIKXMDSOASAFQAw%3D%3D
- Google Maps. (2025, juli 6). Omreisroute van de Moezelweg naar de N57 via de A15 West met bijbehorende afstand. Opgehaald van https://www.google.nl/maps/@51.9118098,4.2258866,15z?entry=tту&g_ep=EgoyMDI1MDYzMC4wIKXMDSOASAFQAw%3D%3D
- Google Maps. (2025, juli 6). Omreisroute van de Moezelweg naar de N57 via de Calandbrug met bijbehorende afstand. Opgehaald van https://www.google.nl/maps/@51.9028558,4.2219299,16.5z?entry=tту&g_ep=EgoyMDI1MDYzMC4wIKXMDSOASAFQAw%3D%3D
- Google Maps. (2025, juli 6). Omreisroute van de N57 naar de Moezelweg via de Neckarweg met bijbehorende afstand. Opgehaald van https://www.google.nl/maps/@51.9032709,4.2195701,16.25z?entry=tту&g_ep=EgoyMDI1MDYzMC4wIKXMDSOASAFQAw%3D%3D
- Google Maps. (2025, mei). Overzicht langzaam rijdend verkeer in de ochtendspits van 2025. Opgehaald van <https://www.google.nl/maps/@51.9001815,4.2045672,14.75z/>
- Google Maps. (z.d.). *Ligging van de Harmsenknoop ten opzichte van het wegennet van regio Rotterdam en Den Haag*. Opgeroepen op maart 4, 2025, van <https://www.google.nl/maps/place/Harmsenbrug/@51.9657809,4.3789423,11.46z/data=!4m6!3m5!1s0x47c44daa5b626069:0x5ff022ad29a6d99c!8m2!3d51.9023167!4d4.2117835!16s>
- Google Maps. (z.d.). *Overzicht Harmsenbrug, Harmsenknoop, N57, A15 en Thomassentunnel*. Opgeroepen op december 5, 2024, van <https://www.google.nl/maps/@51.902197,4.2153061,17z>

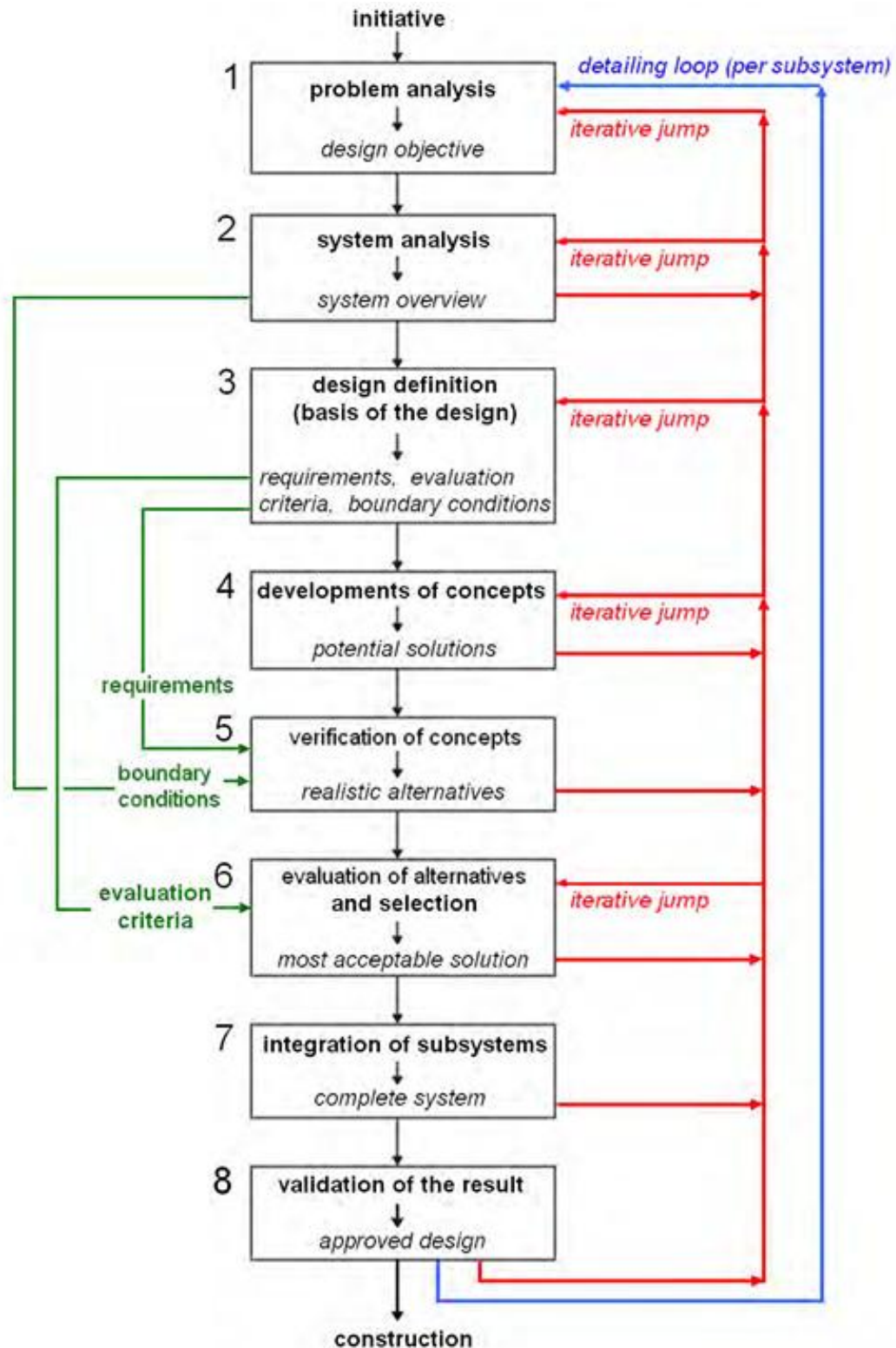
- Google Maps. (z.d.). *Routes en reistijden via de Blankenburgverbinding en de Beneluxtunnel*. Opgeroepen op april 10, 2025, van <https://www.google.nl/maps/>
- Heger, R. (1998). *Driving behavior and driver mental workload as criteria of highway geometric design quality*. Opgeroepen op april 2025, van [https://www.safetylit.org/citations/index.php?fuseaction=citations.viewdetails&citationIds\[\]=citjournalarticle_181127_34](https://www.safetylit.org/citations/index.php?fuseaction=citations.viewdetails&citationIds[]=citjournalarticle_181127_34)
- Heller, I. (2025, april 20). Bespreking van de mogelijkheden voor een alternatieve ontwerpbenadering voor Rijkswaterstaat. (K. van Dongen, Interviewer)
- Heller, I. (2025, maart). Ontwikkeling Rotterdamse Haven en goederenvervoerstromen. (K. van Dongen, Interviewer)
- Hu, J., & et al. (2020, juli 1). Safety evaluation of freeway interchange merging areas based on driver workload theory. *Science Progress*. doi:<https://doi.org/10.1177/0036850420940878>
- INWEVA - Rijkswaterstaat. (z.d.). *INWEVA verkeersintensiteiten*. Opgeroepen op maart 17, 2025, van <https://maps.rijkswaterstaat.nl/gwproj55/index.html?viewer=Inweva.Webviewer>
- Jamson, J., & et al. (2014). *Temporal fluctuations in driving demand: the effect of traffic complexity on subjective measures of workload and driving performance*. Opgeroepen op april 2025, van <https://eprints.whiterose.ac.uk/id/eprint/83623/>
- Li, S., & et al. (2016, november 19). Crash Risk Prediction Modeling Based on the Traffic Conflict Technique and a Microscopic Simulation for Freeway Interchange Merging Areas. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. Opgeroepen op april 2025, van <https://www.mdpi.com/1660-4601/13/11/1157>
- McCartt, A., & et al. (2004, januari 1). Types and characteristics of ramp-related motor vehicle crashes on urban interstate roadways in Northern Virginia. *Journal of Safety Research*, pp. 107-114. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jsr.2003.09.019>
- Mint. (z.d.). *Microsimulaties*. Opgeroepen op april 26, 2025, van https://www.mintnv.be/project_type/microsimulaties/
- Mobilis. (2021). *Theemswegtracé*. Opgeroepen op mei 2025, van <https://www.mobilis.nl/projecten/theemswegtrace#:~:text=In%20het%20Rotterdams%20havengebied%20wordt,bij%20de%20Calandbrug%20bij%20Rozenburg.>
- NRM - Rijkswaterstaat. (2018). Intensiteit-Capaciteit verhoudingen ochtendspits Harmsenknoop voor het basisjaar 2018. Opgeroepen op april 1, 2025
- NRM - Rijkswaterstaat. (z.d.). Nederlands Regionaal Model. Opgeroepen op maart 2025, van <https://mobiliteitsscan-info.nl/overige-pagina/brondata/nrm-lms/>
- NRM- Rijkswaterstaat. (2018). Intensiteit-Capaciteit verhoudingen avondspits Harmsenknoop voor het basisjaar 2018. Opgeroepen op april 1, 2025
- ProRail. (2015). *Ontwerpvoorschrift - Kunstwerken Deel 2- Bouwwerken over en naast het spoor*. Opgeroepen op 2025
- Ramsaran, R. (2025, maart 12). Bespreking van verkeersveiligheidsproblemen van de Harmsenknoop. (K. van Dongen, Interviewer)

- Ramsaran, R., & Visser, G. (2025, maart 16). Bespreking van verkeersveiligheidsproblemen van de Harmsenknoop. (K. van Dongen, Interviewer)
- Rijkswaterstaat - Bouwdienst. (1997). Langsdoorsnede van de Calandbrug. Opgeroepen op mei 2025
- Rijkswaterstaat - Kader verkeersveiligheid. (2020). *Kader verkeersveiligheid - Deel B: Methodieken en achtergrondinformatie*. Opgeroepen op april 2025, van <https://open.rijkswaterstaat.nl/open-overheid/onderzoeksrapporten/@174654/kader-verkeersveiligheid-kader-borgen/>
- Rijkswaterstaat & Royal HaskoningDHV. (2021). *Bereikbaarheid Voorne-Putten en Haven Rotterdam - Onderzoek A*. Opgeroepen op mei 2025
- Rijkswaterstaat. (2015). *Tracébesluit / MER Blankenburgverbinding - Effectenstudie Verkeer*. Opgeroepen op april 16, 2025, van https://blankenburgverbinding.nl/bibliotheek_/bibliotheek+planstudie/default.aspx#folder=494748
- Rijkswaterstaat. (2019). *Kader Wegontwerpproces*. RWS-GPO. Opgeroepen op februari 27, 2025, van <https://verkeersveiligheidsaudits.nl/wp-content/uploads/user/k-heerkensdtvconsultants-nl/Kader-Verkeersveiligheid-3.0-deel-a-1.pdf>
- Rijkswaterstaat. (2019). *Kader Wegontwerpproces voor aanlegprojecten per MIRT-fase*. Opgeroepen op februari 27, 2025, van <https://verkeersveiligheidsaudits.nl/wp-content/uploads/user/k-heerkensdtvconsultants-nl/Kader-Verkeersveiligheid-3.0-deel-a-1.pdf>
- Rijkswaterstaat. (2019). *Kader Wegontwerpproces voor vervanging en renovatie*. Opgeroepen op februari 27, 2025, van <https://verkeersveiligheidsaudits.nl/wp-content/uploads/user/k-heerkensdtvconsultants-nl/Kader-Verkeersveiligheid-3.0-deel-a-1.pdf>
- Rijkswaterstaat. (2019). *Voorbeeld van een rijstrokschema*. Opgeroepen op maart 12, 2025, van <https://verkeersveiligheidsaudits.nl/wp-content/uploads/user/k-heerkensdtvconsultants-nl/Kader-Verkeersveiligheid-3.0-deel-a-1.pdf>
- Rijkswaterstaat. (2019). *Voorbeeld van een viltstiftenschets*. Opgeroepen op maart 12, 2025, van <https://verkeersveiligheidsaudits.nl/wp-content/uploads/user/k-heerkensdtvconsultants-nl/Kader-Verkeersveiligheid-3.0-deel-a-1.pdf>
- Rijkswaterstaat. (2024). Opgehaald van Richtlijnen autosnelwegen: <https://www.rijkswaterstaat.nl/zakelijk/werken-aan-infrastructuur/bouwrichtlijnen-infrastructuur/autosnelwegen>
- Rijkswaterstaat. (2024). *Blankenburgverbinding*. Opgeroepen op april 15, 2025, van <https://blankenburgverbinding.nl/default.aspx>
- Rijkswaterstaat. (2024). *Vernieuwingsopgave - regioanalyse - N57 Harmsenbrug*.
- Rijkswaterstaat. (2025, januari 22). *Groot onderhoud wegen en vaarwegen*. Opgeroepen op februari 13, 2025, van <https://www.rijkswaterstaat.nl/over-ons/onze-organisatie/groot-onderhoud>
- Rijkswaterstaat. (2025, mei 30). *Minder files en betere doorstroming*. Opgehaald van <https://www.rijkswaterstaat.nl/wegen/wegbeheer/minder-files#:~:text=We%20gebruiken%20het%20woord%20file,dan%202025%20km%2Fh%20rijdt>
- Rijkswaterstaat, & Goudappel Coffeng. (2014). *Onderzoek verkeersafwikkeling N57 Harmsenknoop*. Opgeroepen op maart 15, 2025

- Risicokaart. (2024, november 14). *Transport gevaarlijke stoffen*. Opgeroepen op februari 14, 2025, van <https://www.risicokaart.nl/risicosituaties/transport-gevaarlijke-stoffen/>
- ROA. (2019). *Richtlijnen Ontwerp Autosnelwegen (ROA)*. Opgehaald van <https://standaarden.rws.nl/index.html>
- ROA. (2019). *Standaard drie- en vierarmige knooppuntconfiguraties (afbeelding 4.3 en 4.5 uit de ROA)*. Opgeroepen op april 2025, van <https://standaarden.rws.nl/index.html>
- Roosenschoon, M. (2025, april 10). Bespreking van de toekomstige hoogte van de Harmsenbrug. (K. van Dongen, Interviewer)
- SSAM. (2025). Standaardwaarden conflictparameters SSAM.
- Street View - Google Maps. (z.d.). *Zicht van bestuurders vlak voor de scherpe bocht op de uitvoeger van de A15 Oost naar de N57*. Opgehaald van <https://www.google.nl/maps/@51.9035571,4.211679,3a,90y,284.65h,96.98t/>
- Sweco. (2017). *Werkwijzer dynamische verkeersmodellen*.
- Systra. (z.d.). *Paramics*. Opgeroepen op maart 12, 2025, van Digital solutions Systra: <https://www.systra.com/digital/solutions/transport-planning/paramics/>
- U.S. Department of Transportation. (z.d.). Opgeroepen op december 12, 2024, van Surrogate Safety Assessment Model Overview: <https://highways.dot.gov/research/safety/ssam/surrogate-safety-assessment-model-overview>
- van Alphen, R. (2025, februari 17). Keuze voor aanleg- of renovatieproces. (K. van Dongen, Interviewer)
- van Alphen, R., & Eisma, M.-J. (2025, april). Vaststellen van harde en bespreekbare randvoorwaarden. (K. van Dongen, Interviewer)
- van Rongen, M., & de Jong, F. (2025, maart 17). Mogelijkheden van microsimulaties met betrekking tot doorstromings- en verkeersveiligheidsaspecten. (K. van Dongen, Interviewer)
- Vasconcelos, L., Neto, L., & et al. (2014). *Validation of the Surrogate Safety Assessment Model for Assessment of Intersection Safety*. doi:10.3141/2432-01
- VIA - Rijkswaterstaat. (2024). Harmsenknoop ongevalslocaties laatste 11 jaar (2014 - 2024).
- Visser, G. (2025, maart 16). Bespreking van verkeersveiligheidsproblemen van de Harmsenknoop. (K. van Dongen, Interviewer)
- Visser, G., & de Jong, S. (2025, juni 26). Evaluatie van de veiligheidsaspecten van de drie ontwerpen en de microsimulatie. (K. van Dongen, Interviewer)
- Voorendt, M., & Molenaar, W. (2024). *General Lecture Notes Hydraulic Structures*.

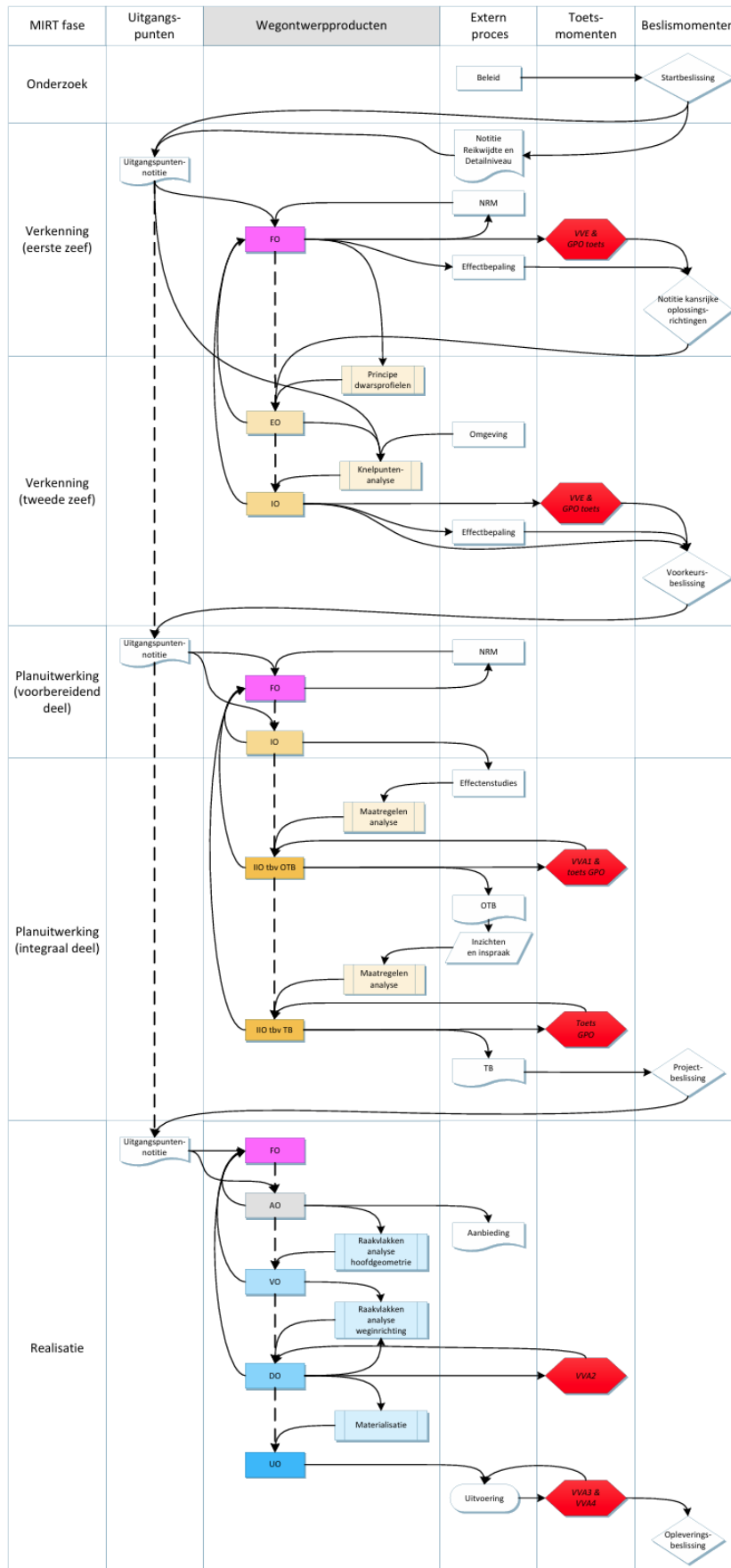
Bijlage 1: Elementaire ontwerpcyclus en figuren uit het Kader Wegontwerproces

Elementaire ontwerpcyclus, zoals toegepast in de civiele techniek



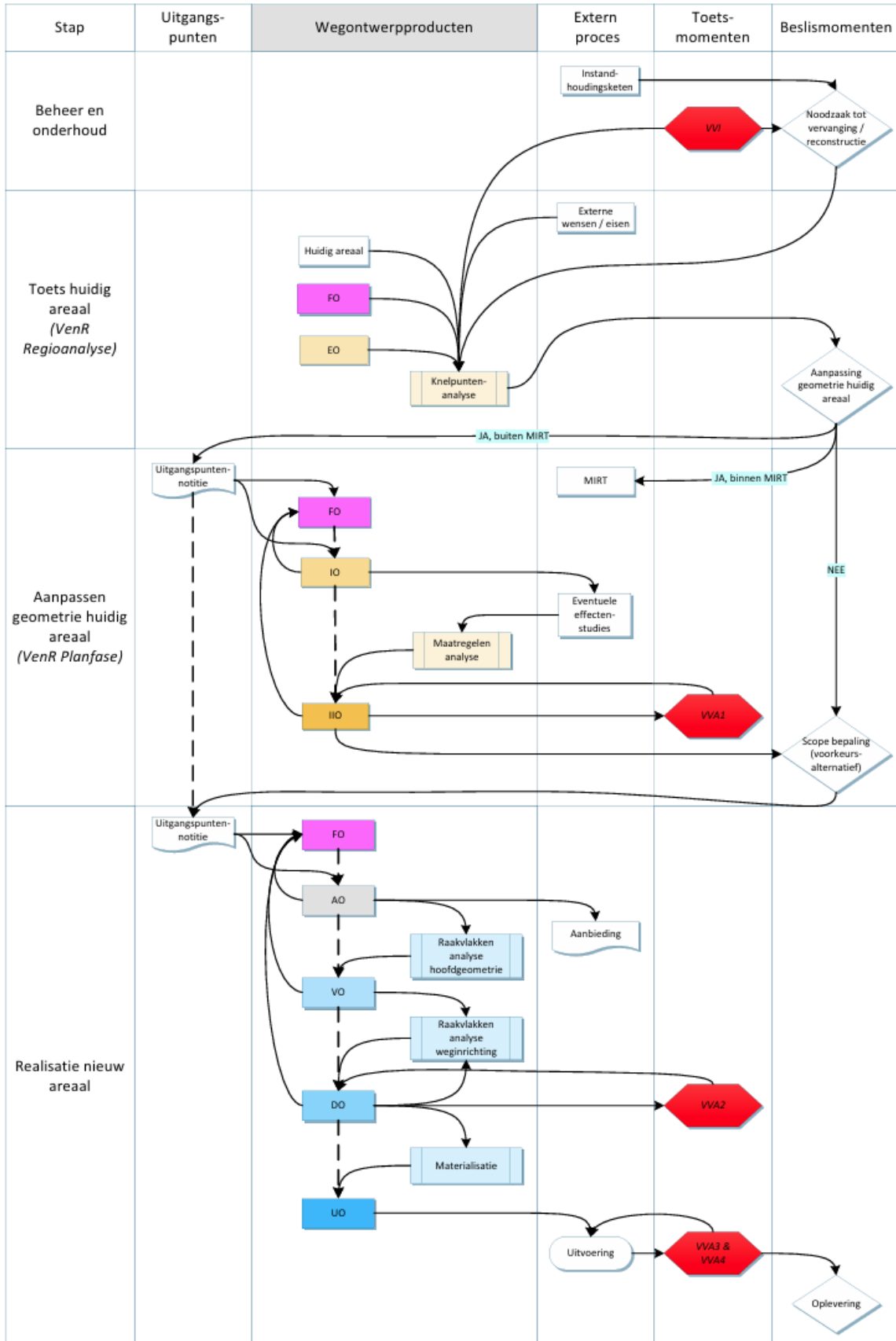
Figuur 49: Elementaire ontwerpcyclus, zoals toegepast in civiele techniek (Voorendt & Molenaar, 2024)

Wegontwerproces voor aanlegprojecten



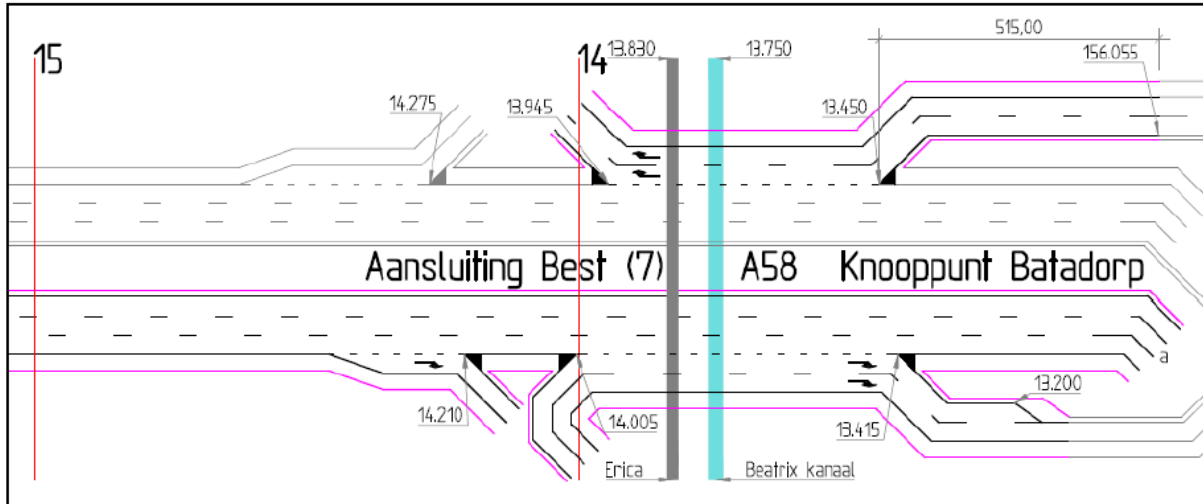
Figuur 50: Kader wegontwerproces voor aanlegprojecten per MIRT-fase (Rijkswaterstaat, 2019)

Wegontwerproces voor renovatieprojecten



Figuur 51: Kader Wegontwerproces voor renovatieprojecten (Rijkswaterstaat, 2019)

Voorbeeld rijstrokenschema uit Kader Wegontwerpproces van Rijkswaterstaat



Figuur 52: Voorbeeld van een rijstrokenschema uit het Kader Wegontwerpproces van Rijkswaterstaat (Rijkswaterstaat, 2019)

Voorbeeld viltstiftenschems uit Kader Wegontwerpproces van Rijkswaterstaat

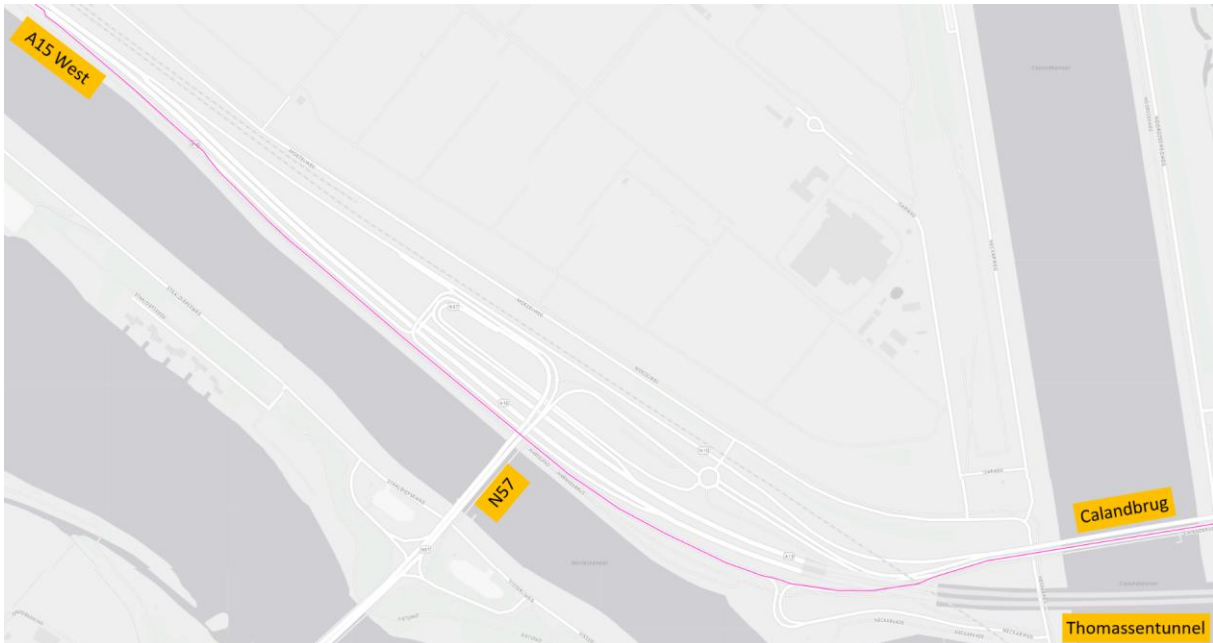


Figuur 53: Voorbeeld van een viltstiftenschems uit het Kader Wegontwerpproces van Rijkswaterstaat (Rijkswaterstaat, 2019)

Bijlage 2: Verschillende routes over de Harmsenknoop

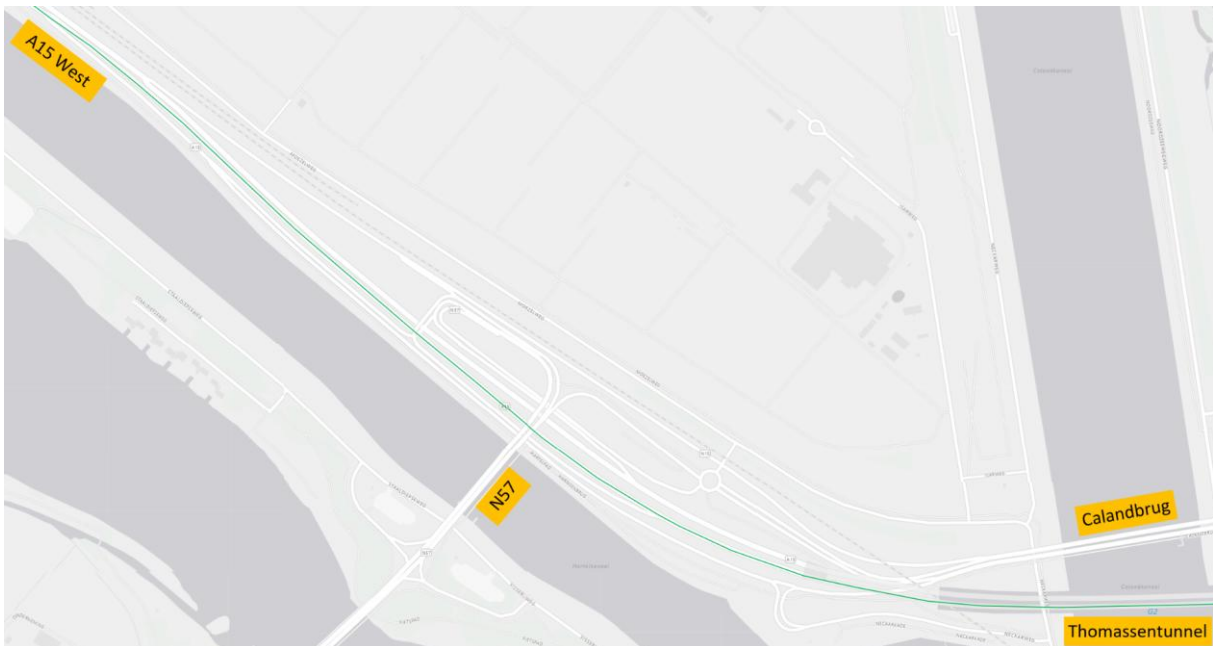
In deze bijlage worden de tien verschillende routes over de huidige Harmsenknoop weergeven.

A15 West → Calandbrug



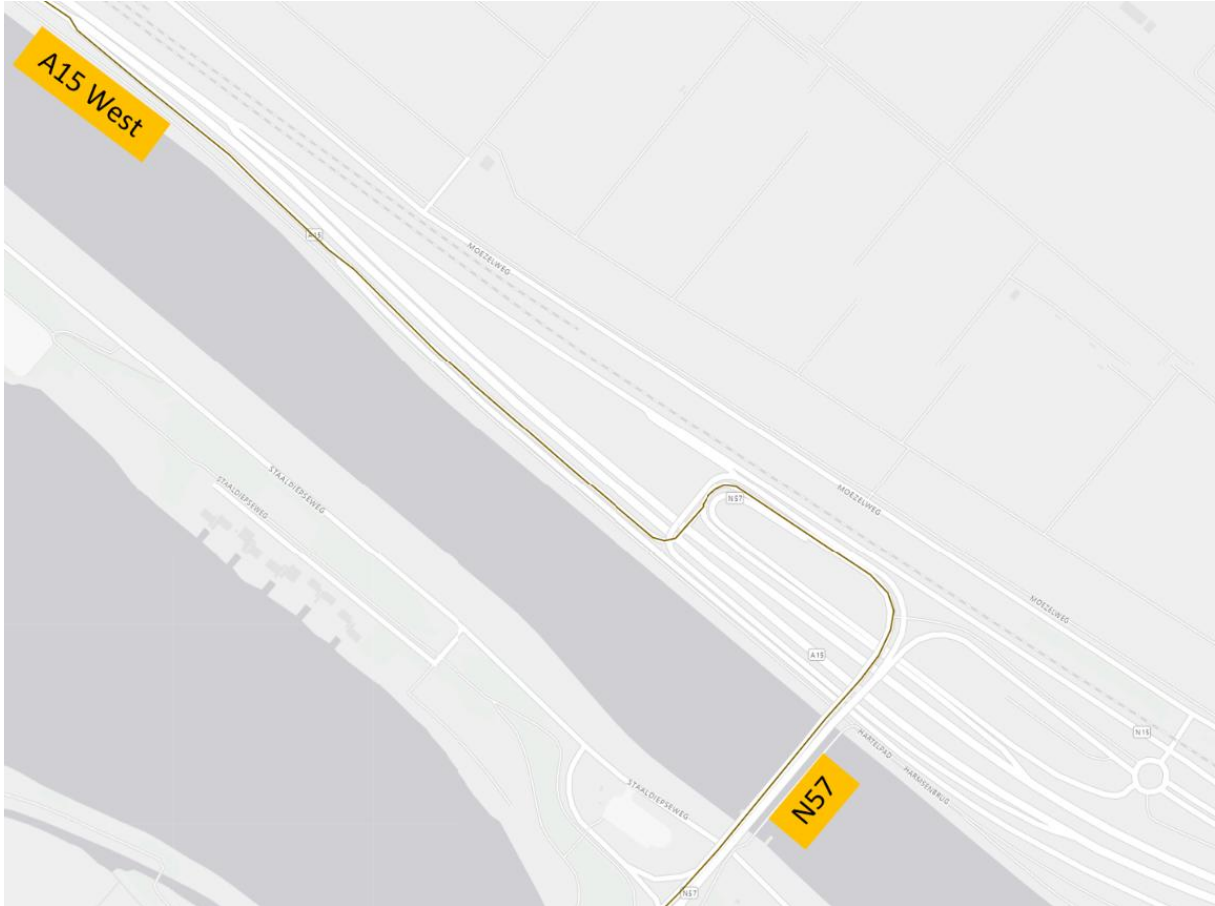
Figuur 54: Weergave van de route A15 West → Calandbrug

A15 West → Thomassentunnel



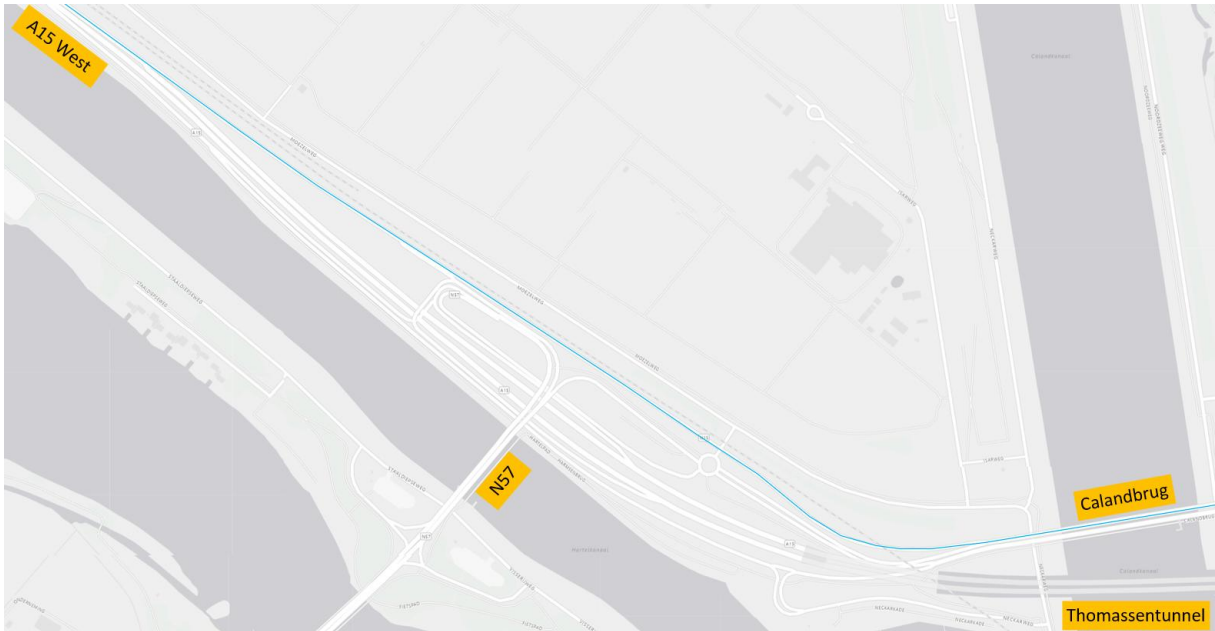
Figuur 55: Weergave van de route A15 West → Thomassentunnel

A15 West → N57



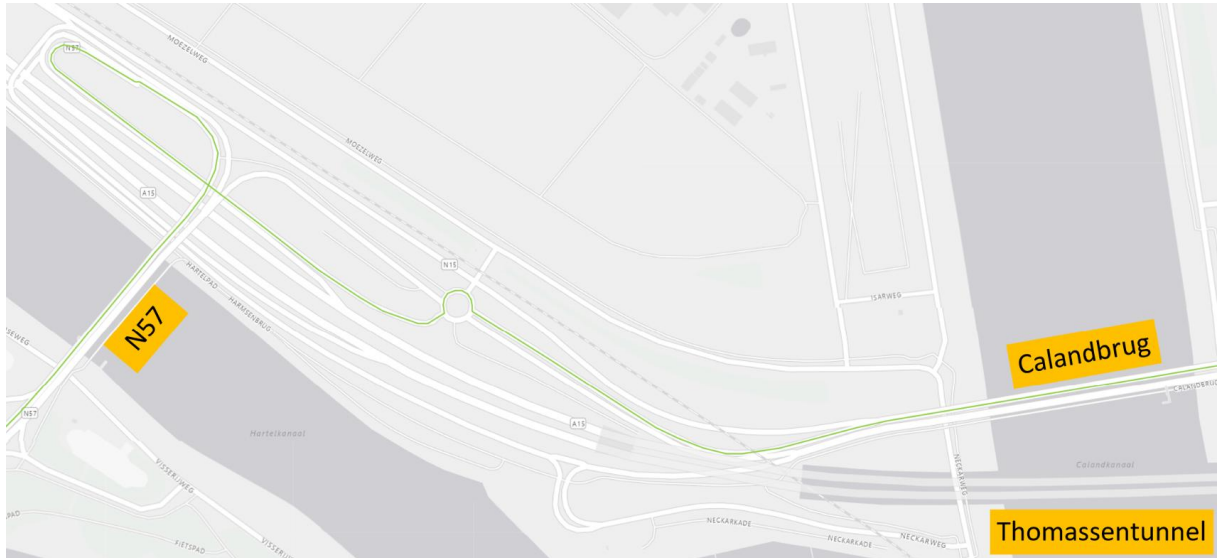
Figuur 56: Weergave van de route A15 West → N57

Calandbrug → A15 West



Figuur 57: Weergave van de route Calandbrug → A15 West

Calandbrug → N57



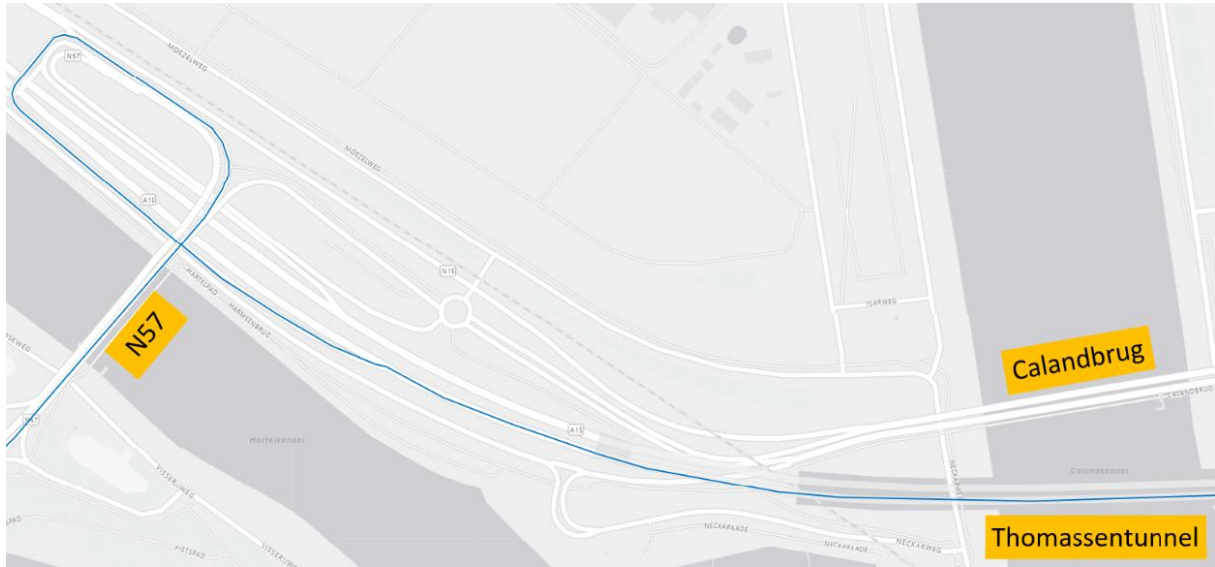
Figuur 58: Weergave van de route Calandbrug → N57

N57 → Calandbrug



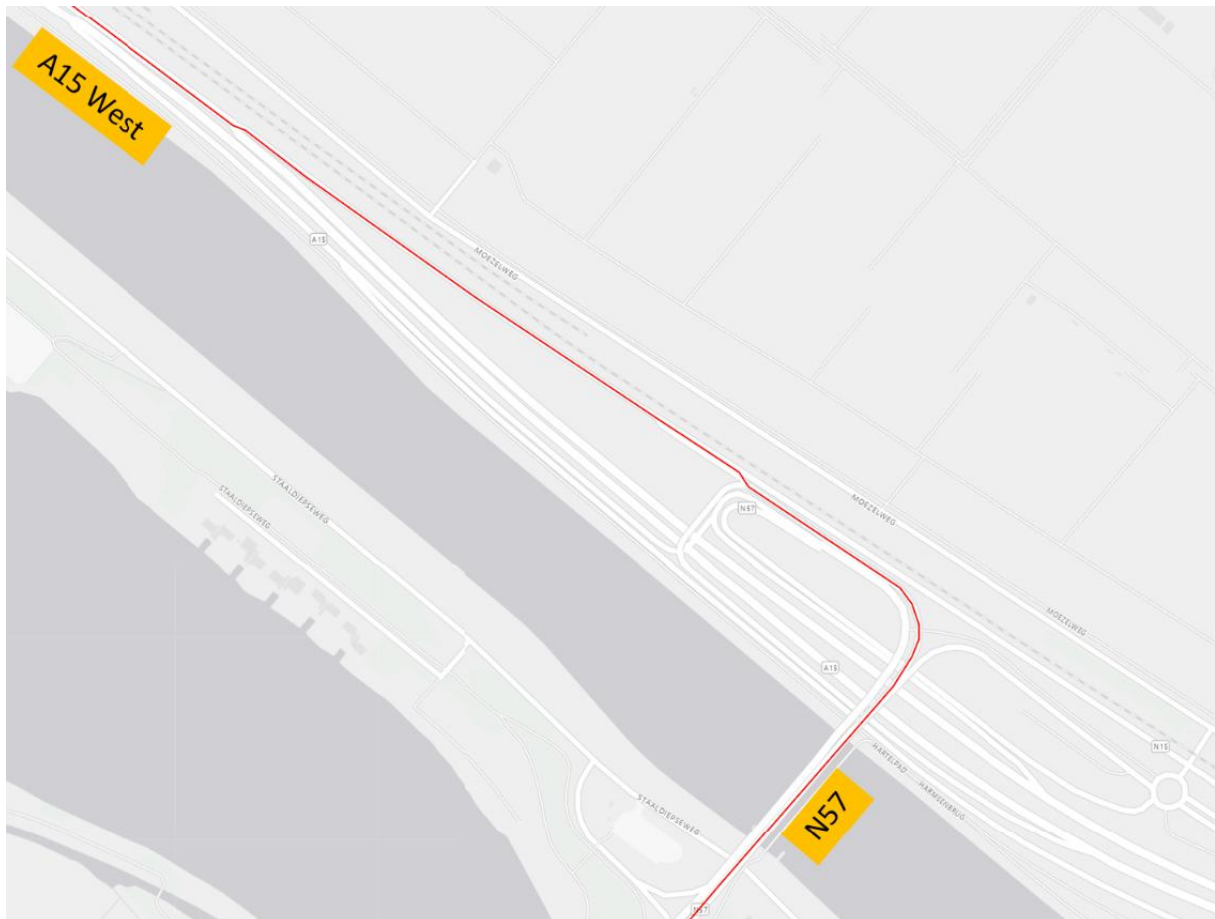
Figuur 59: Weergave van de route N57 → Calandbrug

N57 → Thomassentunnel



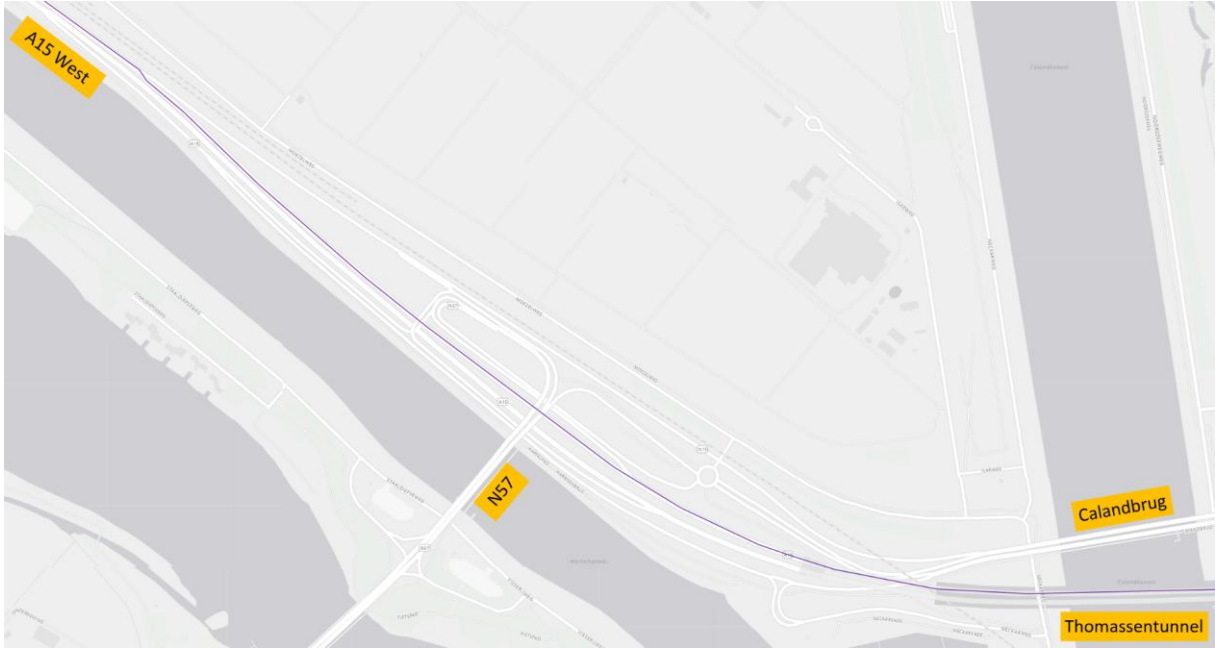
Figuur 60: Weergave van de route N57 → Thomassentunnel

N57 → A15 West



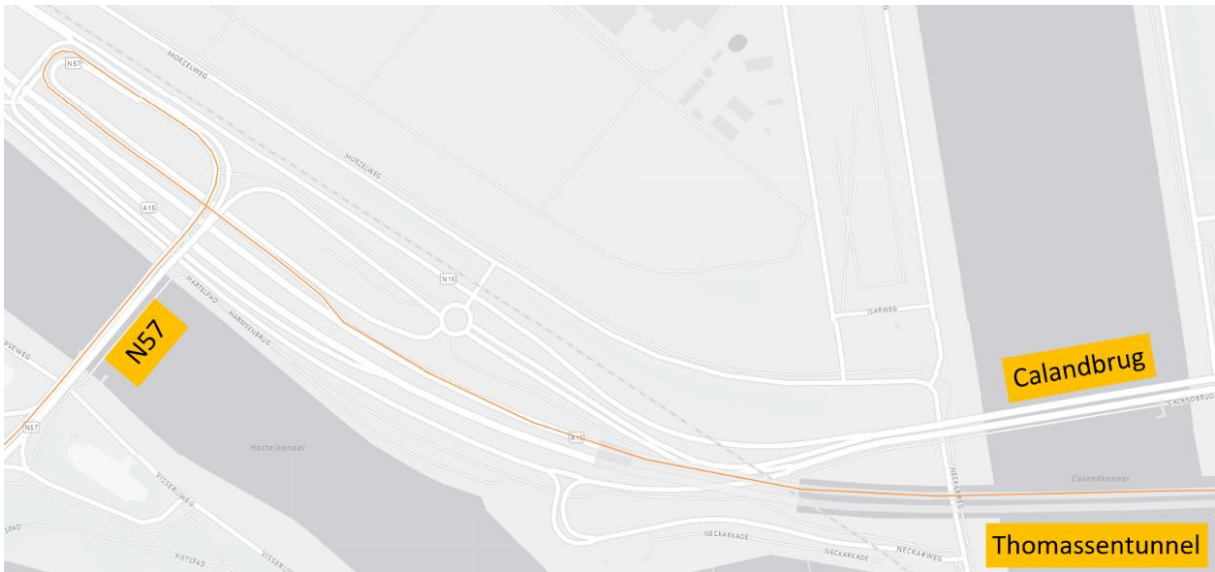
Figuur 61: Weergave van de route N57 → A15 West

Thomassentunnel → A15 West



Figuur 62: Weergave van de route Thomassentunnel → A15 West

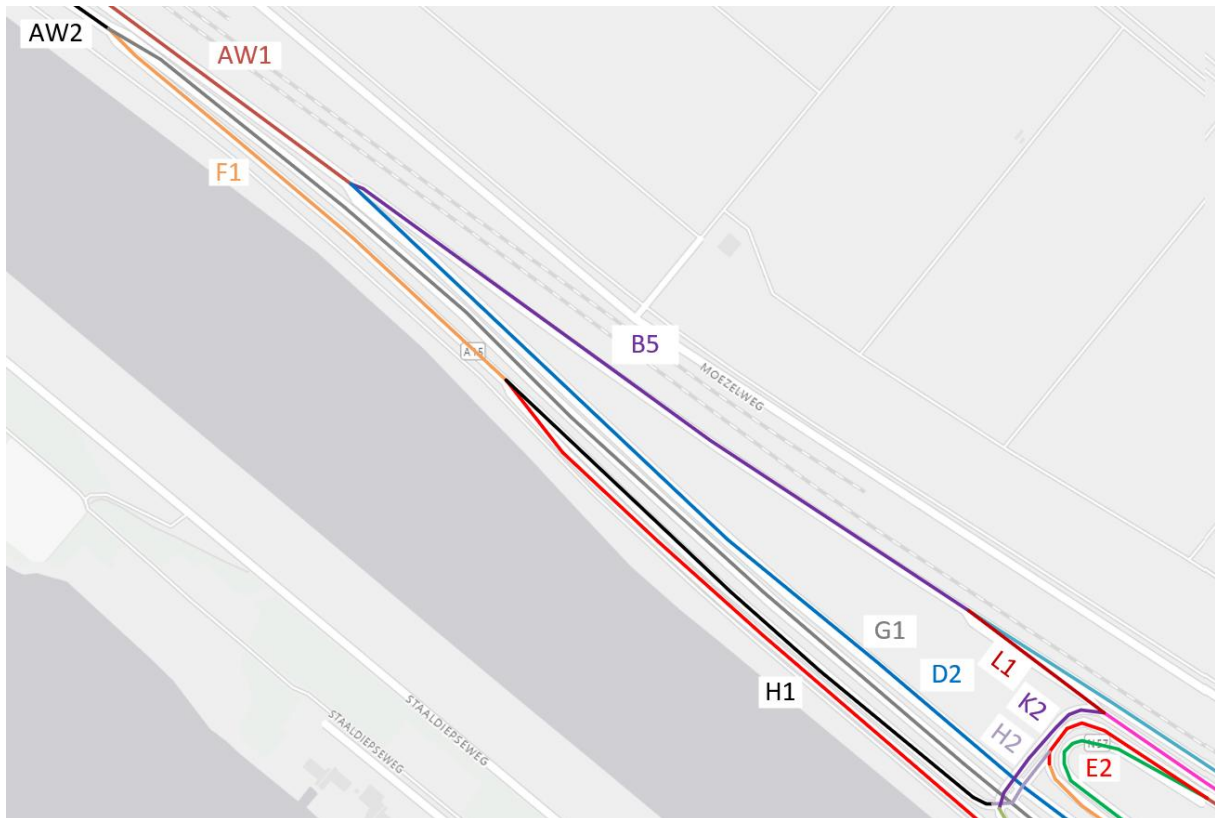
Thomassentunnel → N57



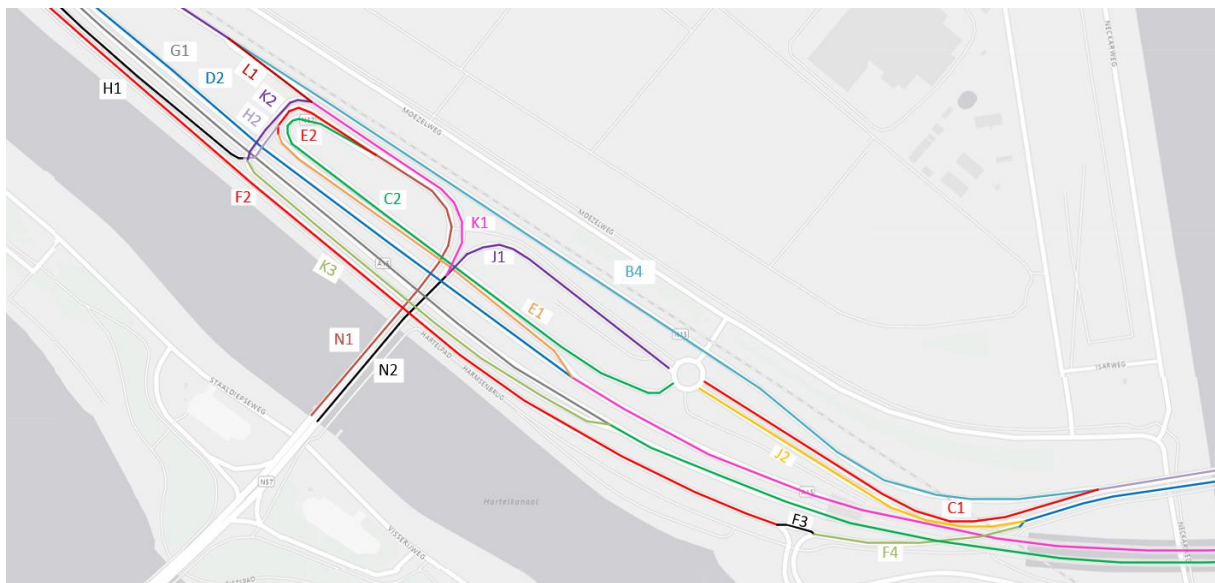
Figuur 63: Weergave van de route Thomassentunnel → N57

Bijlage 4: Weergave van locatie en labels van wegvakken op de Harmsenknoop

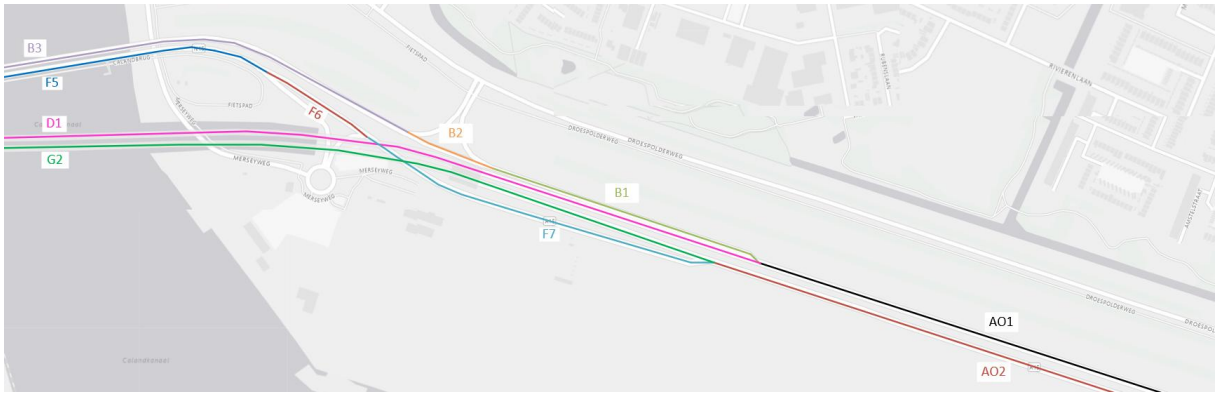
In deze bijlage worden de locaties en labels van de wegvakken op de huidige Harmsenknoop weergegeven in figuren. De wegvakken zijn in verschillende kleuren gevisualiseerd, zodat de bijbehorende labels duidelijk kunnen worden gepresenteerd.



Figuur 66: Locatie en labels van wegvakken deel 1



Figuur 67: Locatie en labels van wegvakken deel 2



Figuur 68: Locatie en labels van wegvakken deel 3

Bijlage 5: Verkeersintensiteiten voor 2023 uit het INWEVA en voor 2040 uit het NRM

In deze bijlage wordt een overzicht gegeven van de verzamelde verkeersintensiteiten van de wegvakken van de Harmsenknoop voor 2023 en 2040. Die van 2023 worden verzameld uit het INWEVA (Intensiteiten op wegvakken) en die van 2040 uit het NRM (Nederlands Regionaal Model). Per wegvak worden de intensiteiten voor de ochtendspits, avondspits en werkdaggemiddelde (INWEVA) of restdag (NRM) in voertuigen per uur [vtg/uur] en in personenauto equivalenten per uur [PAE/uur] gepresenteerd. Daarnaast worden de intensiteiten van de ochtend- en avondspits vergeleken met die van het werkdaggemiddelde of die van de restdag, zodat gecontroleerd kan worden of de ochtend- en avondspits maatgevend zijn over het werkdaggemiddelde en de restdag.

Verkeersintensiteiten 2023

Deze paragraaf geeft een overzicht van de verkeersintensiteiten van de wegvakken op de Harmsenknoop in 2023 uit het INWEVA. De locaties van de wegvakken zijn gepresenteerd in Bijlage 4.

Ochtendspits 2023

Tabel 15: Overzicht verkeersintensiteiten 2023 – ochtendspits (INWEVA - Rijkswaterstaat, z.d.)

Wegvak	Motorvoertuigen [vtg/uur]	Personenauto's [vtg/uur]	Vrachtverkeer (L2 +L3) [vtg/uur]	PAE/uur ochtendspits PAE-factor = 2,0	Vracht- percentage
AO1	2607	2052	555	3162	21%
AO2	2959	2431	528	3486	18%
AW1	1809	1302	507	2315	28%
AW2	1126	684	443	1569	39%
B1	370	296	74	443	20%
B2	88	31	57	145	65%
B3	280	224	56	336	20%
B4	17	1	17	34	97%
B5	227	130	97	324	43%
C1	269	227	42	311	16%
C2	161	96	66	227	41%
D1	2258	1765	493	2750	22%
D2	1576	1169	407	1983	26%
E1	691	617	74	765	11%
E2	726	645	82	808	11%
F1	96	57	39	135	41%
F2	67	34	33	100	50%
F3	19	19	0	19	0%
F4	46	25	21	67	46%
F5	411	329	82	493	20%
F6	271	221	51	322	19%
F7	544	467	77	620	14%
G1	1031	613	418	1449	41%
G2	2427	1973	454	2881	19%
H1	25	20	5	29	18%
H2	25	20	5	29	18%
J1	543	489	55	598	10%
J2	338	284	54	392	16%
K1	1598	1465	133	1730	8%

K2	1413	1361	52	1464	4%
K3	1413	1361	52	1464	4%
L1	208	127	81	289	39%
N1	887	740	147	1033	17%
N2	2084	1897	187	2271	9%

Avondspits 2023

Tabel 16: Overzicht verkeersintensiteiten 2023 – avondspits (INWEVA - Rijkswaterstaat, z.d.)

Wegvak	Motorvoertuigen [vtg/uur]	Personenauto's [vtg/uur]	Vrachtverkeer (L2 +L3) [vtg/uur]	PAE/uur avondspits PAE-factor = 2,0	Vracht- percentage
AO1	2844	2394	451	3295	16%
AO2	2924	2376	549	3473	19%
AW1	882	503	379	1261	43%
AW2	1869	1400	470	2339	25%
B1	395	316	79	474	20%
B2	73	11	62	134	85%
B3	255	192	63	318	25%
B4	27	0	27	53	100%
B5	87	41	46	133	53%
C1	235	195	40	274	17%
C2	427	362	66	493	15%
D1	2462	2095	367	2829	15%
D2	794	455	339	1133	43%
E1	1679	1633	46	1725	3%
E2	1813	1759	54	1866	3%
F1	216	172	45	262	21%
F2	58	21	37	94	63%
F3	78	77	1	78	1%
F4	108	80	29	137	26%
F5	514	432	82	596	16%
F6	214	163	52	266	24%
F7	500	424	76	576	15%
G1	1718	1266	452	2170	26%
G2	2454	1976	478	2932	19%
H1	150	142	8	158	5%
H2	150	142	8	158	5%
J1	223	167	56	279	25%
J2	396	353	43	439	11%
K1	809	742	67	876	8%
K2	735	692	43	777	6%
K3	735	692	43	777	6%
L1	62	40	22	84	36%
N1	2239	2120	119	2358	5%
N2	998	874	124	1122	12%

Werkdaggemiddelde overdag 2023

Tabel 17: Overzicht verkeersintensiteiten 2023 – werkdaggemiddelde overdag (INWEVA - Rijkswaterstaat, z.d.)

Wegvak	Motorvoertuigen [vtg/uur]	Personenauto's [vtg/uur]	Vrachtverkeer (L2 +L3) [vtg/uur]	PAE/uur werkdag PAE-factor = 2,0	Vracht- percentage
AO1	2426	1819	607	3034	25%
AO2	2642	2002	639	3281	24%
AW1	1200	671	530	1730	44%
AW2	1411	878	533	1943	38%
B1	338	247	91	429	27%
B2	93	16	77	169	83%
B3	246	178	68	314	27%
B4	24	0	24	48	100%
B5	137	66	71	208	52%
C1	228	181	47	274	20%
C2	246	168	78	323	32%
D1	2102	1585	516	2618	25%
D2	1061	598	464	1525	44%
E1	1047	980	67	1113	6%
E2	1129	1058	72	1201	6%
F1	147	100	47	194	32%
F2	61	18	42	103	70%
F3	46	46	0	47	0%
F4	76	47	29	104	38%
F5	440	343	97	538	22%
F6	245	182	63	307	26%
F7	501	405	96	597	19%
G1	1298	811	486	1784	37%
G2	2182	1628	555	2737	25%
H1	80	76	5	85	6%
H2	80	76	5	85	6%
J1	310	244	66	376	21%
J2	351	293	58	409	16%
K1	1007	896	112	1119	11%
K2	895	834	61	956	7%
K3	895	834	61	956	7%
L1	113	65	48	161	42%
N1	1375	1226	149	1524	11%
N2	1271	1095	176	1447	14%

Verkeersintensiteiten 2040

Deze paragraaf geeft een overzicht van de verkeersintensiteiten van de wegvakken op de Harmsenknoop in 2040 uit het NRM. De locaties van de wegvakken zijn gepresenteerd in Bijlage 4.

Ochtendspits 2040

Tabel 18: Overzicht verkeersintensiteiten 2040 – ochtendspits (NRM - Rijkswaterstaat, z.d.)

Wegvak	Motorvoertuigen [vtg/uur]	Personenauto's [vtg/uur]	Vrachtverkeer (L2 +L3) [vtg/uur]	PAE/uur ochtendspits PAE-factor = 2,0	Vracht- percentage
AO1	4220	3807	413	4633	10%
AO2	3457	2923	534	3991	15%
AW1	2126	1676	450	2576	21%

AW2	1208	748	460	1668	38%
B1	214	185	29	243	14%
B2	0	0	0	0	0%
B3	181	11	170	351	94%
B4	130	1	129	259	99%
B5	304	126	178	482	59%
C1	41	0	41	82	100%
C2	50	9	41	91	82%
D1	3406	3022	384	3790	11%
D2	1822	1550	272	2094	15%
E1	1583	1471	112	1695	7%
E2	1611	1481	130	1741	8%
F1	19	0	19	38	100%
F2	1	0	1	2	100%
F3	1	0	1	2	100%
F4	1	0	1	2	100%
F5	1190	1129	61	1251	5%
F6	1180	1120	60	1240	5%
F7	1209	1147	62	1271	5%
G1	1189	748	441	1630	37%
G2	2248	1776	472	2720	21%
H1	18	0	18	36	100%
H2	18	0	18	36	100%
J1	1189	1129	60	1249	5%
J2	1189	1129	60	1249	5%
K1	1234	1153	81	1315	7%
K2	1060	1028	32	1092	3%
K3	1060	1028	32	1092	3%
L1	173	124	49	222	28%
N1	1652	1481	171	1823	10%
N2	2424	2282	142	2566	6%

Avondspits 2040

Tabel 19: Overzicht verkeersintensiteiten 2040 – avondspits (NRM - Rijkswaterstaat, z.d.)

Wegvak	Motorvoertuigen [vtg/uur]	Personenauto's [vtg/uur]	Vrachtverkeer (L2 +L3) [vtg/uur]	PAE/uur avondspits PAE-factor = 2,0	Vracht- percentage
AO1	3674	3126	548	4222	15%
AO2	3723	2981	742	4465	20%
AW1	1328	784	544	1872	41%
AW2	2536	1830	706	3242	28%
B1	409	371	38	447	9%
B2	0	0	0	0	0%
B3	512	355	157	669	31%
B4	98	24	74	172	76%
B5	288	180	108	396	38%
C1	414	331	83	497	20%
C2	414	331	83	497	20%
D1	3266	2756	510	3776	16%
D2	1039	603	436	1475	42%

E1	2226	2152	74	2300	3%
E2	2232	2152	80	2312	4%
F1	143	62	81	224	57%
F2	137	62	75	212	55%
F3	137	62	75	212	55%
F4	137	62	75	212	55%
F5	884	714	170	1054	19%
F6	677	652	25	702	4%
F7	1137	1104	33	1170	3%
G1	2393	1768	625	3018	26%
G2	2585	1877	708	3293	27%
H1	6	0	6	12	100%
H2	6	0	6	12	100%
J1	722	650	72	794	10%
J2	747	652	95	842	13%
K1	382	265	117	499	31%
K2	192	109	83	275	43%
K3	192	109	83	275	43%
L1	190	156	34	224	18%
N1	2647	2484	163	2810	6%
N2	1104	915	189	1293	17%

Restdag 2040

Tabel 20: Overzicht verkeersintensiteiten 2040 – restdag (NRM - Rijkswaterstaat, z.d.)

Wegvak	Motorvoertuigen [vtg/uur]	Personenauto's [vtg/uur]	Vrachtverkeer (L2 +L3) [vtg/uur]	PAE/uur restdag PAE-factor = 2,0	Vracht- percentage
AO1	3480	2822	658	4138	19%
AO2	2846	2028	818	3664	29%
AW1	1460	799	661	2121	45%
AW2	1492	813	679	2171	46%
B1	585	546	39	624	7%
B2	0	0	0	0	0%
B3	167	15	152	319	91%
B4	98	1	97	195	99%
B5	340	184	156	496	46%
C1	70	14	56	126	80%
C2	70	14	56	126	80%
D1	2895	2276	619	3514	21%
D2	1120	615	505	1625	45%
E1	1775	1661	114	1889	6%
E2	1803	1661	142	1945	8%
F1	48	17	31	79	65%
F2	20	17	3	23	15%
F3	20	17	3	23	15%
F4	20	17	3	23	15%
F5	1075	949	126	1201	12%
F6	1011	931	80	1091	8%
F7	1339	1233	106	1445	8%
G1	1444	796	648	2092	45%

G2	1508	796	712	2220	47%
H1	28	0	28	56	100%
H2	28	0	28	56	100%
J1	1041	931	110	1151	11%
J2	1055	932	123	1178	12%
K1	306	183	123	429	40%
K2	64	0	64	128	100%
K3	64	0	64	128	100%
L1	242	183	59	301	24%
N1	1872	1675	197	2069	11%
N2	1347	1114	233	1580	17%

Maatgevende verkeersbelasting in 2023 (INWEVA) en 2040 (NRM)

Tabel 21 vergelijkt de verkeersbelasting in Personenauto Equivalenten per uur van de tijdsperiodes ochtendspits, avondspits en werkdaggemiddelde voor 2023 en Tabel 22 vergelijkt die van 2040. De locaties van de wegvakken is weergegeven in Bijlage 4. In beide tabellen is te zien dat zowel in 2023 als in 2040 de ochtend- en avondspits vaker maatgevend zijn dan het werkdaggemiddelde of de restdag. Dit betekent dat dit onderzoek zich uitsluitend zal richten op de intensiteiten in voertuigen per uur van de ochtend- en avondspits, omdat zelfs in deze regio, nabij de Rotterdamse Haven, het aandeel vrachtverkeer niet leidt tot het maatgevend maken van de tijdsperiode restdag/werkdaggemiddelde.

Tabel 21: Totstandkoming van de maatgevende verkeersbelasting (weergegeven in het rood) per wegvak in 2023 (INWEVA - Rijkswaterstaat, z.d.)

Wegvak	PAE/uur ochtendspits PAE-factor = 2,0	PAE/uur avondspits PAE-factor = 2,0	PAE/uur werkdag PAE-factor = 2,0	Maximale PAE/uur
AO1	3162	3295	3034	3295
AO2	3486	3473	3281	3486
AW1	2315	1261	1730	2315
AW2	1569	2339	1943	2339
B1	443	474	429	474
B2	145	134	169	169
B3	336	318	314	336
B4	34	53	48	53
B5	324	133	208	324
C1	311	274	274	311
C2	227	493	323	493
D1	2750	2829	2618	2829
D2	1983	1133	1525	1983
E1	765	1725	1113	1725
E2	808	1866	1201	1866
F1	135	262	194	262
F2	100	94	103	103
F3	19	78	47	78
F4	67	137	104	137
F5	493	596	538	596
F6	322	266	307	322
F7	620	576	597	620
G1	1449	2170	1784	2170

G2	2881	2932	2737	2932
H1	29	158	85	158
H2	29	158	85	158
J1	598	279	376	598
J2	392	439	409	439
K1	1730	876	1119	1730
K2	1464	777	956	1464
K3	1464	777	956	1464
L1	289	84	161	289
N1	1033	2358	1524	2358
N2	2271	1122	1447	2271

Tabel 22: Totstandkoming van de maatgevende verkeersbelasting (weergegeven in het rood) per wegvak in 2040 (NRM - Rijkswaterstaat, z.d.)

Wegvak	PAE/uur ochtendspits PAE-factor = 2,0	PAE/uur avondspits PAE-factor = 2,0	PAE/uur restdag PAE-factor = 2,0	Maximale PAE/uur
AO1	4633	4222	4138	4633
AO2	3991	4465	3664	4465
AW1	2576	1872	2121	2576
AW2	1668	3242	2171	3242
B1	243	447	624	624
B2	0	0	0	0
B3	351	669	319	669
B4	259	172	195	259
B5	482	396	496	496
C1	82	497	126	497
C2	91	497	126	497
D1	3790	3776	3514	3790
D2	2094	1475	1625	2094
E1	1695	2300	1889	2300
E2	1741	2312	1945	2312
F1	38	224	79	224
F2	2	212	23	212
F3	2	212	23	212
F4	2	212	23	212
F5	1251	1054	1201	1251
F6	1240	702	1091	1240
F7	1271	1170	1445	1445
G1	1630	3018	2092	3018
G2	2720	3293	2220	3293
H1	36	12	56	56
H2	36	12	56	56
J1	1249	794	1151	1249
J2	1249	842	1178	1249
K1	1315	499	429	1315
K2	1092	275	128	1092
K3	1092	275	128	1092
L1	222	224	301	301
N1	1823	2810	2069	2810
N2	2566	1293	1580	2566

Bijlage 6: Berekening van de verdeling van het verkeer op de Harmsenknoop in 2023

In deze bijlage wordt de berekening van de verdeling van het verkeer op de Harmsenknoop in 2023 gepresenteerd. Voor elke verkeersstroom wordt berekend hoeveel procent van de hoofdstroom via deze route rijdt. Dit wordt gedaan door de intensiteit van het representatieve wegvak van de verkeersstroom te delen door de totale verkeersintensiteit van de hoofdstroom.

Tabel 23 geeft een overzicht van de representatieve wegvakken per verkeersstroom en de bijbehorende formule voor de berekening van het verdelingspercentage. De percentages worden apart berekend voor personenauto's en het vrachtverkeer voor zowel de ochtend- als avondspits.

Verkeer dat de Harmsenknoop nadert via de A15 West wordt geregistreerd op wegvak AW2, terwijl verkeer vanaf de N57 via wegvak N2 binnenkomt. Verkeer dat via de Calandbrug komt, wordt aangeduid met het label CalandbrugOW (Oost → West), en verkeer via de Thomassentunnel met TunnelOW.

Tabel 23: Overzicht representatieve wegvakken per verkeersstroom op de Harmsenknoop en de berekening van het percentage van de verdeling van het verkeer op de Harmsenknoop

Verkeersstroom	Representatieve wegvak	Berekening percentage
A15 West → Calandbrug	max(F2,F3,F4)	max(F2,F3,F4) / AW2
A15 West → Thomassentunnel	G1	G1 / AW2
A15 West → N57	H1	H1 / AW2
Calandbrug → A15 West	B4	B4 / CalandbrugOW
Calandbrug → N57	max(C1, C2)	max(C1, C2) / CalandbrugOW
N57 → Calandbrug	max(J1, J2)	max(J1, J2) / N2
N57 → Thomassentunnel	K2	K2 / N2
N57 → A15 West	L1	L1 / N2
Thomassentunnel → A15 West	D2	D2 / TunnelOW
Thomassentunnel → N57	E1	E1 / TunnelOW

Ochtendspits 2023

In Tabel 24 worden de totale intensiteiten van de hoofdstromen in de ochtendspits weergegeven.

Tabel 24: Totale intensiteiten van de hoofdstromen in de ochtendspits in 2023 (INWEVA - Rijkswaterstaat, z.d.)

Hoofdstroom	Personenauto's [vtg/uur]	Vrachtverkeer (L2 +L3) [vtg/uur]
A15 West	667	456
Calandbrug	228	82
N57	1977	187
Thomassentunnel	1786	481

In Tabel 25 en Tabel 26 worden de berekende verdelingspercentages weergegeven en de laatste kolom geeft aan van welke hoofdstroom het verkeer komt. Voor de berekening zijn de formules uit Tabel 23 gebruikt.

Als voorbeeld wordt gekeken naar de personenauto's van de verkeersstroom Calandbrug → A15 West. Het representatieve wegvak van deze stroom is B4 en het percentage wordt berekend door de intensiteit van B4 te delen door de totale intensiteit van de CalandbrugOW. Dit geeft de formule: $\frac{1}{228} * 100\% = 0,2\%$. Dit betekent dat 0,2% van het verkeer van de Calandbrug naar de A15 West gaat.

Tabel 25: Berekening percentages verdeling in 2023 voor personenauto's in de ochtendspits (INWEVA - Rijkswaterstaat, z.d.)

Verkeersstroom	Personenauto's representatieve wegvak [vtg/uur]	Personenauto's percentage ochtendspits	Hoofdstroom waar het verkeer vandaan komt
A15 West → Calandbrug	34	5,0%	A15 West
A15 West → Thomassentunnel	613	92,0%	A15 West
A15 West → N57	20	3,0%	A15 West
Calandbrug → A15 West	1	0,2%	Calandbrug
Calandbrug → N57	227	99,8%	Calandbrug
N57 → Calandbrug	489	24,7%	N57
N57 → Thomassentunnel	1361	68,9%	N57
N57 → A15 West	127	6,4%	N57
Thomassentunnel → A15 West	1169	65,5%	Thomassentunnel
Thomassentunnel → N57	617	34,5%	Thomassentunnel

Tabel 26: Berekening percentages verdeling in 2023 voor vrachtverkeer in de ochtendspits (INWEVA - Rijkswaterstaat, z.d.)

Verkeersstroom	Vrachtverkeer maatgevende wegvak [vtg/uur]	Vrachtverkeer percentage ochtendspits	Hoofdstroom waar het verkeer vandaan komt
A15 West → Calandbrug	33	7,2%	A15 West
A15 West → Thomassentunnel	418	91,8%	A15 West
A15 West → N57	5	1,0%	A15 West
Calandbrug → A15 West	17	20,1%	Calandbrug
Calandbrug → N57	66	79,9%	Calandbrug
N57 → Calandbrug	55	29,1%	N57
N57 → Thomassentunnel	52	27,5%	N57
N57 → A15 West	81	43,3%	N57
Thomassentunnel → A15 West	407	84,6%	Thomassentunnel
Thomassentunnel → N57	74	15,4%	Thomassentunnel

Avondspits 2023

De verdelingspercentages van de avondspits worden op dezelfde manier als de ochtendspits berekend.

Tabel 27: Totale intensiteiten van de hoofdstromen in de avondspits in 2023 (INWEVA - Rijkswaterstaat, z.d.)

Hoofdstroom	Personenauto's [vtg/uur]	Vrachtverkeer (L2 +L3) [vtg/uur]
A15 West	1488	497
Calandbrug	362	92
N57	1085	121
Thomassentunnel	2088	385

Tabel 28: Berekening percentages verdeling in 2023 voor personenauto's in de avondspits (INWEVA - Rijkswaterstaat, z.d.)

Verkeersstroom	Personenauto's representatieve wegvak [vtg/uur]	Personenauto's percentage ochtendspits	Hoofdstroom waar het verkeer vandaan komt
A15 West → Calandbrug	80	5,3%	A15 West
A15 West → Thomassentunnel	1266	85,1%	A15 West
A15 West → N57	142	9,5%	A15 West
Calandbrug → A15 West	0	0,0%	Calandbrug
Calandbrug → N57	362	100,0%	Calandbrug
N57 → Calandbrug	353	32,5%	N57
N57 → Thomassentunnel	692	63,8%	N57
N57 → A15 West	40	3,7%	N57
Thomassentunnel → A15 West	455	21,8%	Thomassentunnel
Thomassentunnel → N57	1633	78,2%	Thomassentunnel

Tabel 29: Berekening percentages verdeling in 2023 voor vrachtverkeer in de avondspits (INWEVA - Rijkswaterstaat, z.d.)

Verkeersstroom	Vrachtverkeer representatieve wegvak [vtg/uur]	Vrachtverkeer percentage ochtendspits	Hoofdstroom waar het verkeer vandaan komt
A15 West → Calandbrug	37	7,4%	A15 West
A15 West → Thomassentunnel	452	91,0%	A15 West
A15 West → N57	8	1,6%	A15 West
Calandbrug → A15 West	27	28,8%	Calandbrug
Calandbrug → N57	66	71,2%	Calandbrug
N57 → Calandbrug	56	46,5%	N57
N57 → Thomassentunnel	43	35,3%	N57
N57 → A15 West	22	18,3%	N57
Thomassentunnel → A15 West	339	88,1%	Thomassentunnel
Thomassentunnel → N57	46	11,9%	Thomassentunnel

Overzicht percentages

Tabel 30 en Tabel 31 geven een overzicht van alle berekende verdelingspercentages van het verkeer in 2023 voor respectievelijk de personenauto's en het vrachtverkeer.

Tabel 30: Overzicht berekende percentages voor personenauto's

Verkeersstroom	Percentage van	Personenauto's percentages	
		Ochtendspits	Avondspits
A15 West → Calandbrug	A15 West	5,0%	5,3%
A15 West → Thomassentunnel	A15 West	92,0%	85,1%
A15 West → N57	A15 West	3,0%	9,5%
Calandbrug → A15 West	Calandbrug	0,2%	0,0%
Calandbrug → N57	Calandbrug	99,8%	100,0%
N57 → Calandbrug	N57	24,7%	32,5%
N57 → Thomassentunnel	N57	68,9%	63,8%
N57 → A15 West	N57	6,4%	3,7%
Thomassentunnel → A15 West	Thomassentunnel	65,5%	21,8%
Thomassentunnel → N57	Thomassentunnel	34,5%	78,2%

Tabel 31: Overzicht berekende percentages voor vrachtverkeer

Verkeersstroom	Percentage van	Vrachtverkeer percentages	
		Ochtendspits	Avondspits
A15 West → Calandbrug	A15 West	7,2%	7,4%
A15 West → Thomassentunnel	A15 West	91,8%	91,0%
A15 West → N57	A15 West	1,0%	1,6%
Calandbrug → A15 West	Calandbrug	20,1%	28,8%
Calandbrug → N57	Calandbrug	79,9%	71,2%
N57 → Calandbrug	N57	29,1%	46,5%
N57 → Thomassentunnel	N57	27,5%	35,3%
N57 → A15 West	N57	43,3%	18,3%
Thomassentunnel → A15 West	Thomassentunnel	84,6%	88,1%
Thomassentunnel → N57	Thomassentunnel	15,4%	11,9%

Bijlage 7: Berekening maatgevende verkeersbelasting in 2040 op basis van de verdeling van het verkeer in 2023

In deze bijlage wordt de verkeersbelasting in 2040 berekend aan de hand van de verdeling van het verkeer in 2023. Hiervoor worden allereerst de totale intensiteiten op de vier hoofdstromen (A15 West, Calandbrug, N57 en Thomassentunnel) in 2040 bepaald.

Verdeling verkeer Calandbrug en Thomassentunnel in 2023

Bij de analyse van verkeer in de richting Oost → West worden nieuwe percentages berekend om het aandeel verkeer te bepalen dat van de A15 Oost naar respectievelijk de Calandbrug of Thomassentunnel rijdt. Hiervoor worden de volgende formules gehanteerd:

Percentage (p) verkeer van A15 Oost naar Calandbrug:

$$p_{A15\ Oost \rightarrow Calandbrug} = \frac{B3 - V_{van\ Droespolderweg}}{D1 + (B3 - V_{van\ Droespolderweg})} \quad (10)$$

Percentage (p) verkeer van A15 Oost naar Thomassentunnel:

$$p_{A15\ Oost \rightarrow Tunnel} = \frac{D1}{D1 + (B3 - V_{van\ Droespolderweg})} \quad (11)$$

Waarbij:

- **B3** = verkeersintensiteit op wegvak B3 (Calandbrug, richting Oost → West)
- **D1** = verkeersintensiteit op wegvak D1 (Thomassentunnel, richting Oost → West)
- **V_{van Droespolderweg}** = intensiteit van verkeer dat vanaf de Droespolderweg de Calandbrug oprijdt

Het is van belang te benadrukken dat het verkeer op de Calandbrug afkomstig is van twee bronnen: verkeer vanaf de A15 Oost en verkeer dat via de Droespolderweg de brug oprijdt. Bij het bepalen van het aandeel van het verkeer dat vanaf de A15 Oost afkomstig is, moet het verkeer vanaf de Droespolderweg worden afgetrokken van de totale intensiteit op de Calandbrug. Dit voorkomt dat een te groot percentage van het verkeer ten onrechte aan de A15 Oost wordt toegeschreven.

De verdelingspercentages van het verkeer van de A15 Oost over de Calandbrug en Thomassentunnel worden apart berekend voor de personenauto's en het vrachtverkeer voor zowel de ochtend- als avondspits. Tabel 32 geeft de resultaten van de berekende percentages.

Tabel 32: Berekende percentages voor verkeer over Calandbrug en Thomassentunnel in 2023 (INWEVA - Rijkswaterstaat, z.d.)

	Personenauto		Vrachtverkeer	
	Ochtendspits	Avondspits	Ochtendspits	Avondspits
Percentage van A15 Oost naar brug	1,5%	0,8%	2,8%	3,9%
Percentage van A15 Oost naar tunnel	98,5%	99,2%	97,2%	96,1%

Berekening intensiteiten van de hoofdstromen in 2040

De intensiteiten voor de hoofdstromen A15 West en N57 kunnen rechtstreeks worden afgelezen uit het Nederlands Regionaal Model (NRM). Voor de intensiteiten van het verkeer op de Calandbrug en in de Thomassentunnel (CalandbrugOW en TunnelOW) worden berekend met de volgende formules:

Intensiteit van hoofdstroom CalandbrugOW:

$$CalandbrugOW = (p_{A15\ Oost \rightarrow Calandbrug} * (A01 - V_{naar\ Droespolderweg})) + V_{van\ Droespolderweg} \quad (12)$$

Intensiteit van hoofdstroom TunnelOW:

$$TunnelOW = p_{A15\ Oost \rightarrow Tunnel} * (A01 - V_{naar\ Droespolderweg}) \quad (13)$$

Waarbij:

- **AO1** = verkeersintensiteit op wegvak AO1 (A15 Oost voor de afslag naar de Calandbrug en de Droespolderweg)
- **V_{naar Droespolderweg}** = intensiteit van verkeer dat vanaf de A15 Oost naar de Droespolderweg afslaat

Deze berekeningen worden afzonderlijk uitgevoerd voor personenauto's en vrachtverkeer in zowel de ochtend- als avondspits. Tabel 33 geeft een overzicht van de benodigde intensiteiten van 2040 uit het NRM en Tabel 34 geeft de resultaten van de intensiteiten van de vier hoofdstromen.

Tabel 33: Overzicht benodigde intensiteiten uit het NRM in 2040 (NRM - Rijkswaterstaat, z.d.)

Verkeer	Personenauto [vtg/uur]		Vrachtverkeer [vtg/uur]	
	Ochtendspits	Avondspits	Ochtendspits	Avondspits
Vanaf N57 (N2)	2282	915	142	189
Vanaf A15 West (AW2)	748	1830	460	706
Vanaf A15 Oost (AO1)	3807	3126	413	548
Vanaf Droespolderweg	11	355	170	157
Naar Droespolderweg	785	371	29	36

Tabel 34: Overzicht verkeersintensiteiten van de hoofdstromen in 2040 (NRM - Rijkswaterstaat, z.d.)

Hoofdstroom	Personenauto [vtg/uur]		Vrachtverkeer [vtg/uur]	
	Ochtendspits	Avondspits	Ochtendspits	Avondspits
A15 West	748	1830	460	706
Calandbrug	57	378	181	177
N57	2282	915	142	189
Thomassentunnel	2976	2732	373	492

Berekening maatgevende verkeersbelasting in 2040 met berekende verdelingspercentages 2023

Nu de intensiteiten van de hoofdstromen in 2040 bekend zijn, kunnen de intensiteiten van de verkeersstromen op de Harmsenknoop worden berekend. Dit wordt gedaan met de verdelingspercentages uit Tabel 30 en Tabel 31. De intensiteiten worden berekend door de verdelingspercentages te vermenigvuldigen met de intensiteit van de bijbehorende hoofdstroom.

Als voorbeeld wordt gekeken naar de personenauto's van de verkeersstroom A15 West → Calandbrug. In de ochtendspits geldt een verdelingspercentage van 5,0%, wat betekent dat 5,0% van de personenauto's van de A15 West naar de Calandbrug zal rijden. In 2040 betekent dit dat 5,0% van de intensiteit van de hoofdstroom A15 West via de verkeersstroom A15 West → Calandbrug zal gaan. Dit komt neer op 5,0% van de intensiteit van de A15 West, oftewel $5,0\% * 748 \approx 38$ voertuigen per uur.

Het is belangrijk op te merken dat de percentages in deze berekening zijn afgerond, maar dat de daadwerkelijke berekening is uitgevoerd met de niet-afgeronde waarden. Dit kan betekenen dat het berekende aantal voertuigen één voertuig hoger is dan wanneer het percentage zou zijn afgerond.

Tabel 35 geeft een overzicht van de berekende per intensiteiten per verkeersstroom in 2040. Hierbij is het opvallend dat de verkeersstroom Calandbrug → A15 West geen personenauto's heeft voor de ochtend- en avondspits in 2040. Dit houdt in dat deze verbindingsweg een vrachtpercentage van 100% heeft. Deze tekortkoming van het NRM is besproken met verkeersadviseurs van Rijkswaterstaat en is aangenomen dat deze intensiteit niet werkelijk nul is, maar dusdanig laag is dat één rijstrook volstaat (de Bruijn & van Rongen, 2025).

Om tot een realistisch vrachtpercentage voor deze verkeersstroom te komen, worden de vrachtpercentages van alle verkeersstromen berekend, zodat het gemiddelde vrachtpercentage ook bij de verkeersstroom Calandbrug → A15 West kan worden toegepast.

Het vrachtpercentage wordt berekend volgens de volgende formule:

$$\text{Vrachtpercentage} = \frac{\text{Aantal vrachtwagens (L2 + L3)}}{\text{Totaal aantal motorvoertuigen (L1 + L2 + L3)}} * 100\% \quad (14)$$

Waarbij:

- **L1** = het aantal personenauto's [vtg/uur]
- **L2 en L3** = het aantal middelzware en zware vrachtwagens [vtg/uur]
- **Totaal aantal motorvoertuigen** = de som van L1, L2 en L3

De berekende vrachtpercentages zijn in de laatste kolom van Tabel 35 opgenomen. Hieruit blijkt dat het gemiddelde vrachtpercentage rond de 35% is. Dit levert voor de verkeersstroom Calandbrug → A15 West bij 36 vrachtauto's in de ochtendspits en 51 vrachtauto's in de avondspits, respectievelijk 67 en 95 personenauto's op voor deze verkeersstroom.

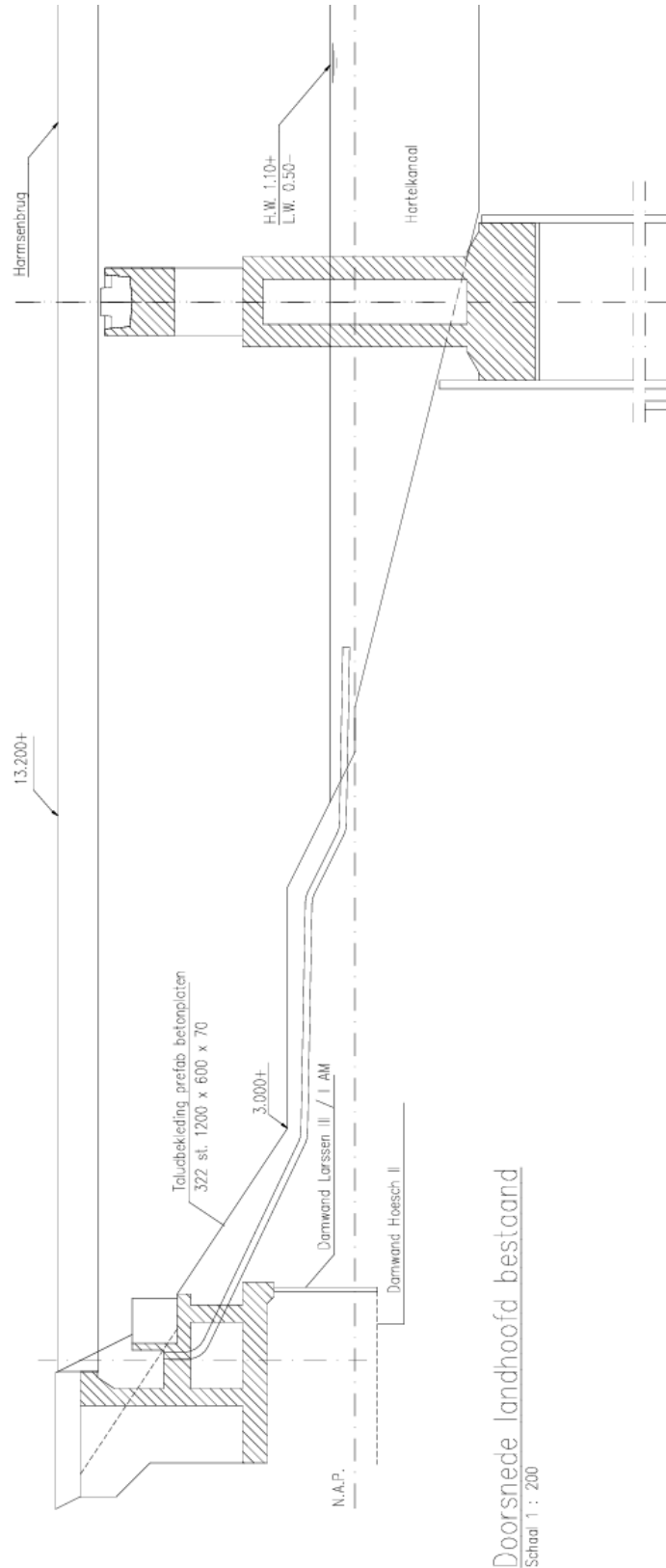
Tabel 35: Overzicht berekende intensiteiten per verkeersstroom in 2040

Verkeersstroom	Personenauto [vtg/uur]		Vrachtverkeer [vtg/uur]		Vrachtpercentage	
	Ochtendspits	Avondspits	Ochtendspits	Avondspits	Ochtendspits	Avondspits
A15 West → Calandbrug	38	98	33	52	46%	35%
A15 West → Thomassentunnel	688	1557	422	643	38%	29%
A15 West → N57	22	175	5	11	19%	6%
Calandbrug → A15 West	0 → 67	0 → 95	36	51	35%	35%
Calandbrug → N57	57	378	144	126	72%	25%
N57 → Calandbrug	564	297	41	88	7%	23%
N57 → Thomassentunnel	1571	584	39	67	2%	10%
N57 → A15 West	147	34	62	35	30%	51%
Thomassentunnel → A15 West	1948	595	316	433	14%	42%
Thomassentunnel → N57	1028	2137	57	59	5%	3%

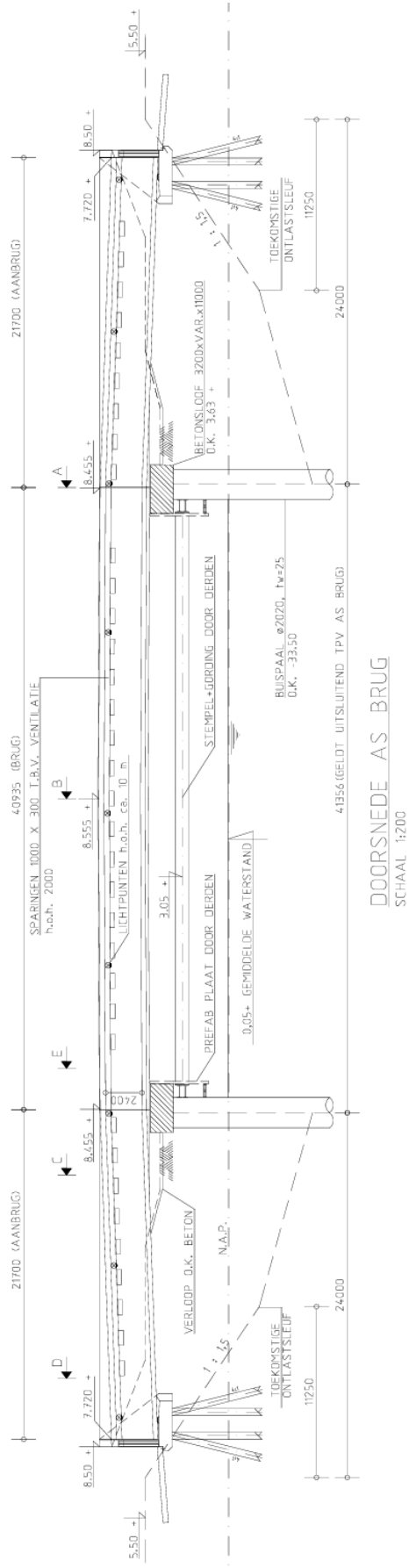
Bijlage 8: Technische tekeningen

Deze bijlage geeft een overzicht van de technische tekeningen van de Harmsenbrug, Calandbrug en Thomassentunnel.

Harmsenbrug

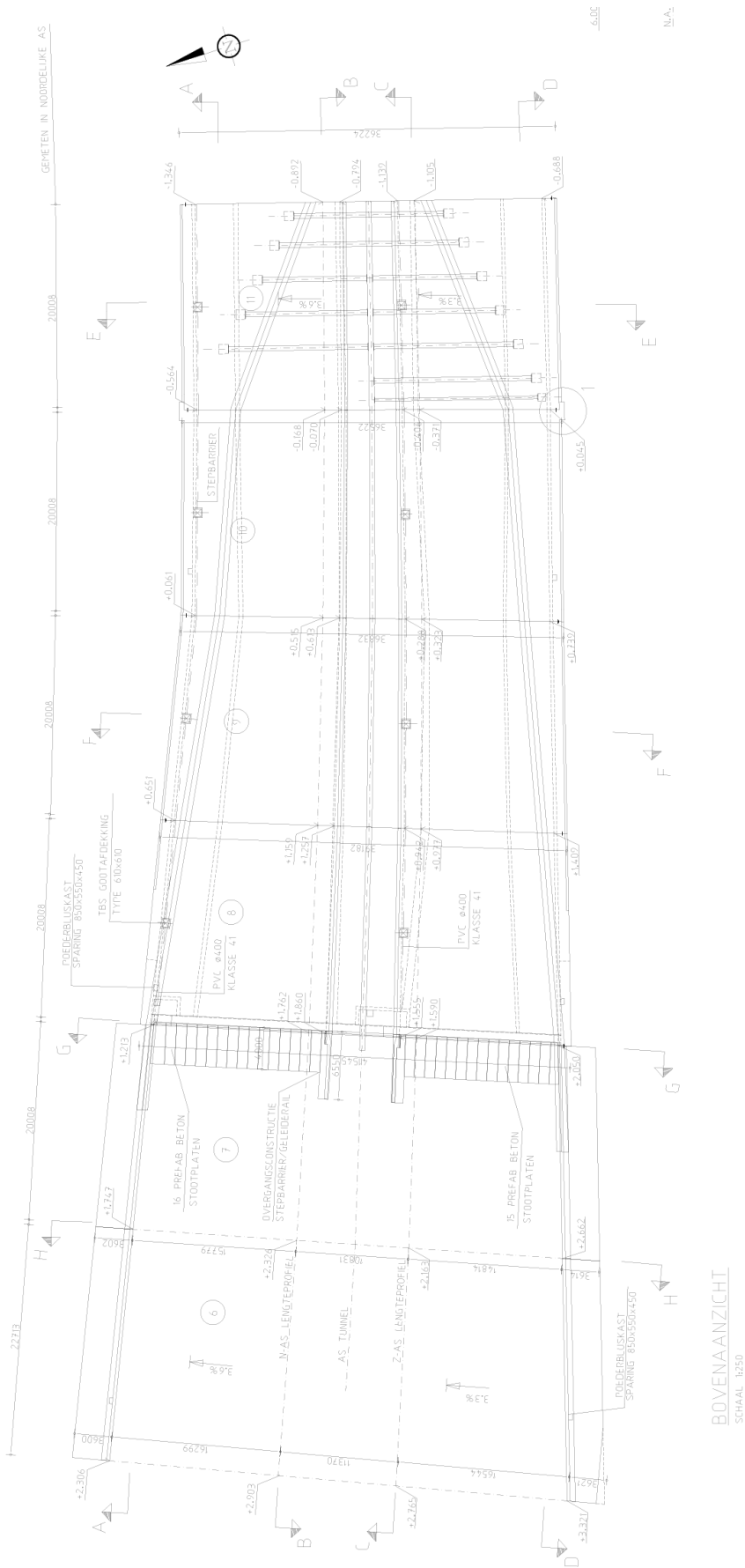


Figuur 69: Doorsnede bestaande landhoofd van de Harmsenbrug (Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, 2019)



Figuur 70: Langsdoorsnede van de Calandbrug (Rijkswaterstaat - Bouwdienst, 1997)

Thomassentunnel



Figuur 71: Bovenaanzicht westelijke tunnelmond Thomassentunnel (Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, 2004)

Bijlage 9: Berekening van benodigde aantal rijstroken

In deze bijlage wordt voor elke verkeersstroom op de Harmsenknoop het benodigde aantal rijstroken berekend. Dit wordt gedaan door de verwachte toekomstige intensiteit te vergelijken met de benodigde capaciteit. Capaciteit is de maximale intensiteit die een wegvak kan afwikkelen en wordt weergegeven in voertuigen per uur [vtg/uur] (CIA - Rijkswaterstaat, 2024).

Het Handboek Capaciteiten Infrastructuur Autosnelwegen (CIA) geeft voor verschillende type verbindingswegen en snelwegen de capaciteitswaarden, die zijn omgerekend aan de hand van reductiefactoren voor de bijbehorende vrachtpercentages.

Tabel 36 en Tabel 37 berekenen op basis van de intensiteiten uit Tabel 4 (Hoofdstuk 5) de bijbehorende vrachtpercentages (Vergelijking 6) voor respectievelijk de ochtend- en avondspits. In de laatste kolom van deze tabellen worden deze vrachtpercentages afgerond op een veelvoud van 5%, conform de classificaties van het Handboek Capaciteiten Infrastructuur Autosnelwegen (CIA - Rijkswaterstaat, 2024). Het afronden is noodzakelijk, omdat de capaciteitswaarden in het CIA slechts voor discrete vrachtpercentages (in stappen van 5%) beschikbaar zijn.

Tabel 36: Berekening en afronding van vrachtpercentages in de ochtendspits van 2040 (NRM - Rijkswaterstaat, z.d.)

Ochtendspits 2040 Verkeersstroom	Intensiteiten [vtg/uur]		Vrachtpercentages	
	Personenauto's	Vrachtverkeer	Berekende percentage	Afgerond op veelvoud van 5%
A15 West → Calandbrug	38	33	46%	45%
A15 West → Thomassentunnel	688	422	38%	40%
A15 West → N57	22	5	19%	20%
Calandbrug → A15 West	67	36	35%	35%
Calandbrug → N57	57	144	72%	70%
N57 → Calandbrug	564	41	7%	10%
N57 → Thomassentunnel	1571	39	2%	5%
N57 → A15 West	147	62	30%	30%
Thomassentunnel → A15 West	1948	316	14%	15%
Thomassentunnel → N57	1028	57	5%	5%

Tabel 37: Berekening en afronding van vrachtpercentages in de avondspits van 2040 (NRM - Rijkswaterstaat, z.d.)

Avondspits 2040 Verkeersstroom	Intensiteiten [vtg/uur]		Vrachtpercentages	
	Personenauto's	Vrachtverkeer	Berekende percentage	Afgerond op veelvoud van 5%
A15 West → Calandbrug	98	52	35%	35%
A15 West → Thomassentunnel	1557	643	29%	30%
A15 West → N57	175	11	6%	5%
Calandbrug → A15 West	95	51	35%	35%
Calandbrug → N57	378	126	25%	25%
N57 → Calandbrug	297	88	23%	25%
N57 → Thomassentunnel	584	67	10%	10%
N57 → A15 West	34	35	51%	50%
Thomassentunnel → A15 West	595	433	42%	40%
Thomassentunnel → N57	2137	59	3%	5%

In Tabel 38 worden de capaciteitswaarden uit de CIA voor verbindingswegen bij knooppunten weergegeven. Deze waarden gelden bij een vrachtpercentage van 15%.

Tabel 38: Capaciteitswaarden voor verbindingswegen bij knooppunten bij 15% vrachtverkeer (CIA - Rijkswaterstaat, 2024)

Capaciteit verbindingswegen	Capaciteit (C) in vtg/uur
Verbindingsweg (klaverbladlus) met 1 rijstrook	1650
Verbindingsweg (overig) met 1 rijstrook	1700
Verbindingsweg (overig) met 2 rijstroken	3000

Tabel 36 en Tabel 37 laten zien dat de vrachtpercentages op de knoop variëren tussen 5% en 70%. Deze spreiding wordt veroorzaakt door de nabijheid van de Rotterdamse haven, waardoor sommige routes op de Harmsenknop een groot aandeel vrachtverkeer bevatten. In Tabel 39 zijn de reductiefactoren uit de CIA gepresenteerd, die gebruikt worden om de capaciteitswaarden bij 15% vrachtverkeer om te rekenen naar andere vrachtpercentages.

Tabel 39: Reductiefactoren voor het omrekenen van de capaciteitswaarden bij 15% vrachtverkeer (CIA - Rijkswaterstaat, 2024)

Percentage vrachtverkeer bij een PAE-factor van 2,0	Reductiefactor	Omgerkende capaciteit verbindingswegen		
		Klaverbladlus 1 rijstrook	Overig met 1 rijstrook	Overig met 2 rijstroken
0%	1,15	1898	1955	3450
5%	1,10	1815	1870	3300
10%	1,05	1733	1785	3150
15%	1,00	1650	1700	3000
20%	0,96	1584	1632	2880
25%	0,92	1518	1564	2760
30%	0,88	1452	1496	2640
35%	0,84	1386	1428	2520
40%	0,80	1320	1360	2400
45%	0,76	1254	1292	2280
50%	0,72	1188	1224	2160
55%	0,68	1122	1156	2040
60%	0,64	1056	1088	1920
65%	0,60	990	1020	1800
70%	0,56	924	952	1680

Met behulp van de reductiefactoren kan voor elke verkeersstroom de bijbehorende capaciteit van de drie soorten verbindingswegen van Tabel 38 worden berekend. Vervolgens wordt op basis van de norm $\frac{I}{C} \leq 0,8$ per verkeersstroom bepaald welk type verbindingsweg toereikend is bij de maatgevende intensiteit (CIA - Rijkswaterstaat, 2024). Volgens Tabel 2.1 van de CIA zorgt een I/C-verhouding kleiner of gelijk aan 0,8 voor een goede verkeersafwikkeling zonder file, met uitzondering van incidenten. Een I/C-verhouding groter dan 0,8 zal leiden tot regelmatige of structurele file (CIA - Rijkswaterstaat, 2024). Daarnaast wordt de norm $\frac{I}{C} \leq 0,8$ ook binnen de Richtlijnen Ontwerp Autosnelwegen (ROA) gebruikt als uitgangspunt bij het ontwerpen van autosnelwegen (ROA, 2019).

De resultaten van het aantal benodigde rijstroken en bijbehorende type verbindingsweg per verkeersstroom zijn weergegeven in Tabel 40. Hierbij is in de laatste kolom het benodigde type verbindingsweg vastgesteld door, van de typen die zijn bepaald voor de ochtend- en avondspits, het type te hanteren met het hoogste aantal rijstroken of de hoogste kwaliteitswaarde.

Uit de berekening volgt dat voor alle verbindingen, behalve N57 → Thomassentunnel en Thomassentunnel → N57, een klaverbladlus met één rijstrook, ofwel een indirecte verbinding, toereikend is. Voor de verbindingen tussen de N57 en de Thomassentunnel daarentegen zijn twee rijstroken nodig, waardoor dit een semirecte of directe verbinding vereist. Dit komt doordat deze verkeersstroom in de ochtendspits maatgevend is in de richting N57 → Thomassentunnel, terwijl de andere richting (Thomassentunnel → N57) in de avondspits maatgevend is.

Tabel 40: Overzicht berekening aantal rijstroken en type verbindingsweg per verkeersstroom (CIA - Rijkswaterstaat, 2024)

Verkeersstroom	Ochtendspits		Avondspits		Maatgevende type verbindingsweg
	Benodigde capaciteit bij $I/C \leq 0,8$	Benodigde type verbindingsweg	Benodigde capaciteit bij $I/C \leq 0,8$	Benodigde type verbindingsweg	
A15 West → Calandbrug	89	Klaverbladlus	188	Klaverbladlus	Klaverbladlus
A15 West → Thomassentunnel*	1388	-	2750	-	-
A15 West → N57	34	Klaverbladlus	233	Klaverbladlus	Klaverbladlus
Calandbrug → A15 West	129	Klaverbladlus	183	Klaverbladlus	Klaverbladlus
Calandbrug → N57	251	Klaverbladlus	630	Klaverbladlus	Klaverbladlus
N57 → Calandbrug	756	Klaverbladlus	481	Klaverbladlus	Klaverbladlus
N57 → Thomassentunnel	2013	2 stroken (geen lus)	814	Klaverbladlus	2 stroken (geen lus)
N57 → A15 West	261	Klaverbladlus	86	Klaverbladlus	Klaverbladlus
Thomassentunnel → A15 West*	2830	-	1285	-	-
Thomassentunnel → N57	1356	Klaverbladlus	2745	2 stroken (geen lus)	2 stroken (geen lus)

* De verkeersstromen A15 West ↔ Thomassentunnel worden verbonden door de autosnelweg de A15.

De verkeersstromen tussen de A15 West en de Thomassentunnel hebben geen verbindingswegen nodig, omdat zij verbonden worden door de autosnelweg de A15. Om te bepalen hoeveel rijstroken de rijbanen van deze snelweg moeten bevatten, worden de capaciteitswaarden voor autosnelwegen uit de CIA gehanteerd. Deze waarden zijn in Tabel 41 weergegeven.

Tabel 42 berekent op basis van het vrachtpercentage en bijbehorende reductiefactoren de benodigde capaciteit, waarbij wordt uitgegaan van de toekomstige intensiteit en de norm $\frac{I}{C} \leq 0,8$. Vervolgens wordt voor beide richtingen van de snelweg het benodigde aantal rijstroken in de ochtend- en avondspits bepaald, waarna per verkeersstroom het hoogste aantal als maatgevend wordt gehanteerd.

Tabel 41: Capaciteitswaarden voor autosnelwegen bij 15% vrachtverkeer (CIA - Rijkswaterstaat, 2024)

Capaciteit wegvakken autosnelwegen	Capaciteit (C) in vtg/uur		
	Bij 15% vrachtverkeer	Bij 30% vrachtverkeer	Bij 40% vrachtverkeer
1 rijstrook (lengte < 1500 m)	2100	1848	1640
2 rijstroken	4100	3608	3280
3 rijstroken	6200	5456	4960

Tabel 42: Overzicht berekening aantal rijstroken voor de rijbanen van de snelweg de A15 (CIA - Rijkswaterstaat, 2024)

Verkeersstroom	Vrachtpercentage	Reductiefactor	Tijdperiode	Benodigde capaciteit bij $I/C \leq 0,8$	Benodigd aantal rijstroken	Maatgevende aantal rijstroken
A15 West → Thomassentunnel	40%	0,8	Ochtendspits	1388	1	2
			Avondspits	2750	2	
Thomassentunnel → A15 West	15%	1,0	Ochtendspits	2830	2	2
			Avondspits	1285	1	

Uit Tabel 42 blijkt dat voor zowel de verkeersstroom A15 West → Thomassentunnel als Thomassentunnel → A15 West een rijbaan met twee rijstroken toereikend is.

Bijlage 10: Informatie voor de keuze tot de geschikte knooppuntvorm

Deze bijlage geeft een overzicht van de gebruikte informatie uit onder andere Hoofdstuk 4 en 5 van de Richtlijnen Ontwerp Autosnelwegen (ROA) om tot de keuze voor de geschikte knooppuntvorm voor het ideale ontwerp van de Harmsenknoop te komen.

Voordat gekeken kan worden naar mogelijke knooppunt- en/of aansluitingsvormen moet de wegcategorie van de wegvakken van de Harmsenknoop worden bepaald. Dit vanwege het feit dat de type wegcategorieën van de kruisende wegen bepalen welke verbinding (ongelijkvloerse knooppunten of (on)gelijkvloerse aansluitingen) noodzakelijk zijn.

De wegcategorieën van de wegvakken op de Harmsenknoop zijn bepaald op basis van de inrichting en lijnmarkeringen, waarbij in overleg met een wegontwerp expert van Rijkswaterstaat een overzicht van de wegcategorieën op de Harmsenknoop is opgesteld. Omdat de N57 en N15 (over de Calandbrug) beide regionale stroomwegen (autowegen) zijn, terwijl de A15 West en de weg door de Thomassentunnel (A15 Oost) autosnelwegen zijn, vindt bij de verbindingswegen tussen deze wegvakken een overgang van wegcategorie plaats. In het overzicht in Tabel 43 is voor elk wegvak het aantal rijstroken weergegeven en is aangegeven welke wegcategorie aan het begin en einde van het wegvak wordt toegepast.

Tabel 43: Overzicht van de wegcategorieën van de wegvakken op de Harmsenknoop

Verkeersstroom	Aantal rijstroken	Wegcategorie aan het begin van het wegvak	Wegcategorie aan het eind van het wegvak
A15 West → Calandbrug	1	Autosnelweg	Regionale stroomweg
A15 West → Thomassentunnel	2	Autosnelweg	Autosnelweg
A15 West → N57	1	Autosnelweg	Regionale stroomweg
Calandbrug → A15 West	1	Regionale stroomweg	Autosnelweg
Calandbrug → N57	1	Regionale stroomweg	Regionale stroomweg
N57 → Calandbrug	1	Regionale stroomweg	Regionale stroomweg
N57 → Thomassentunnel	2	Regionale stroomweg	Autosnelweg
N57 → A15 West	1	Regionale stroomweg	Autosnelweg
Thomassentunnel → A15 West	2	Autosnelweg	Autosnelweg
Thomassentunnel → N57	2	Autosnelweg	Regionale stroomweg

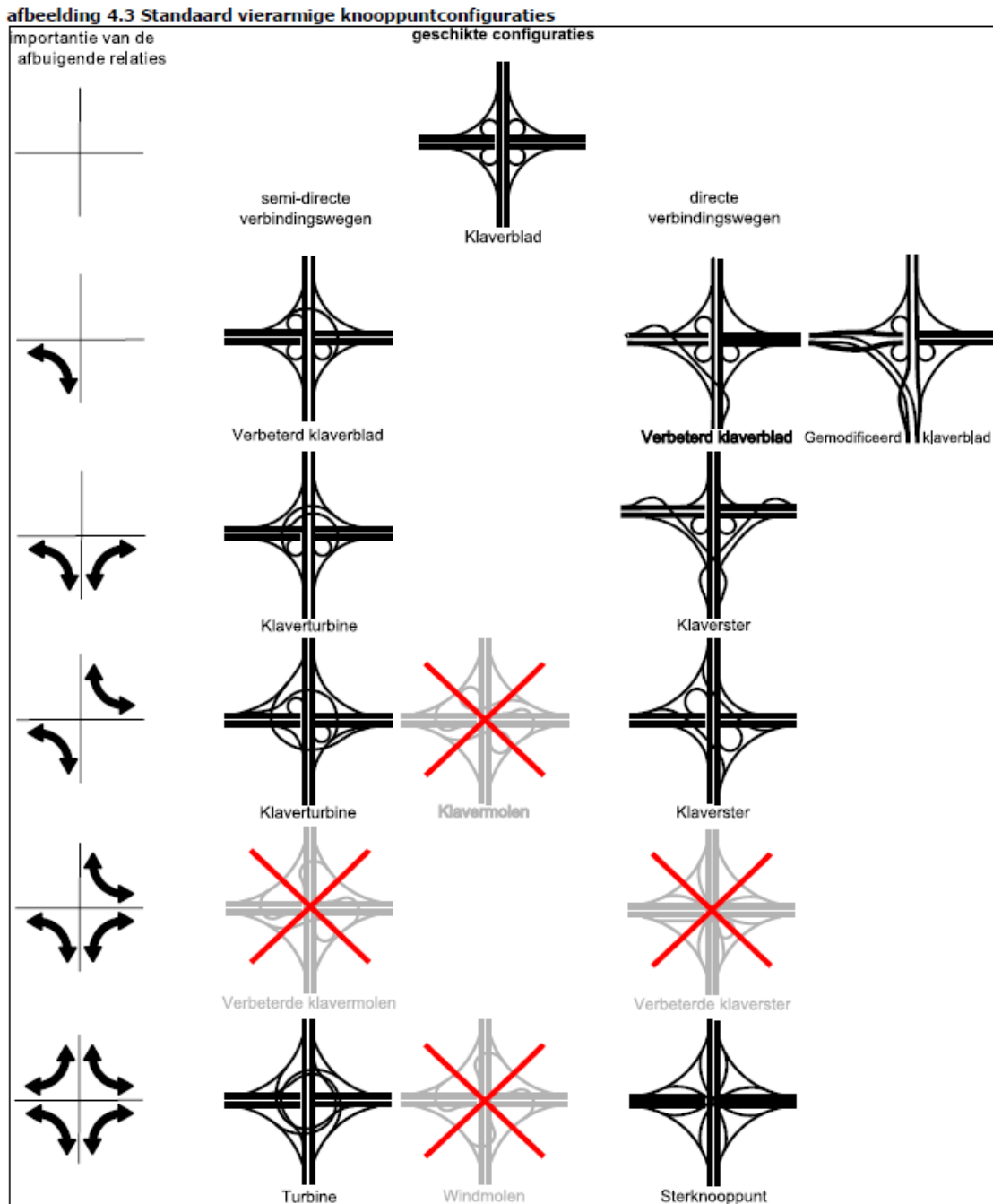
Uit Tabel 43 blijkt dat alle wegvakken op de Harmsenknoop ofwel een regionale stroomweg ofwel een autosnelweg zijn. Beide vallen volgens de CROW onder zogenoemde stroomwegen, waardoor verbindingen tussen deze wegen met ongelijkvloerse kruisingen (knooppunten) moet gebeuren (CROW - Wegontwerp BBK, 2025). Dit betekent dat de genoemde aansluitingsvormen in hoofdstuk 4 van de ROA, zoals de Haarlemmermeeraansluiting en half-klaverbladaansluiting, afvallen voor het ontwerp van de Harmsenknoop.

Omdat zowel de N57 als de N15 over de Calandbrug gescheiden rijbanen hebben, kan volgens de ROA dezelfde redenering bij een knooppunt tussen een regionale stroomweg en nationale stroomweg worden gebruikt als bij een knooppunt tussen twee nationale stroomwegen (autosnelwegen) (ROA, 2019). Hierdoor kunnen alle verbindingswegen van de Harmsenknoop worden ontworpen volgens de ROA, waarbij ze omwille van de verkeersveiligheid en robuustheid verplicht een vluchtstrook moeten hebben.

In paragraaf 4.3.4 van de ROA wordt toegelicht dat in knooppunten met een regionale stroomweg (RSW), kan worden volstaan met een minder hoogwaardige knooppuntvorm, waardoor geen rangeerbaan nodig is bij een klaverbladlus (ROA, 2019). Daarnaast geldt bij een knooppunt met een

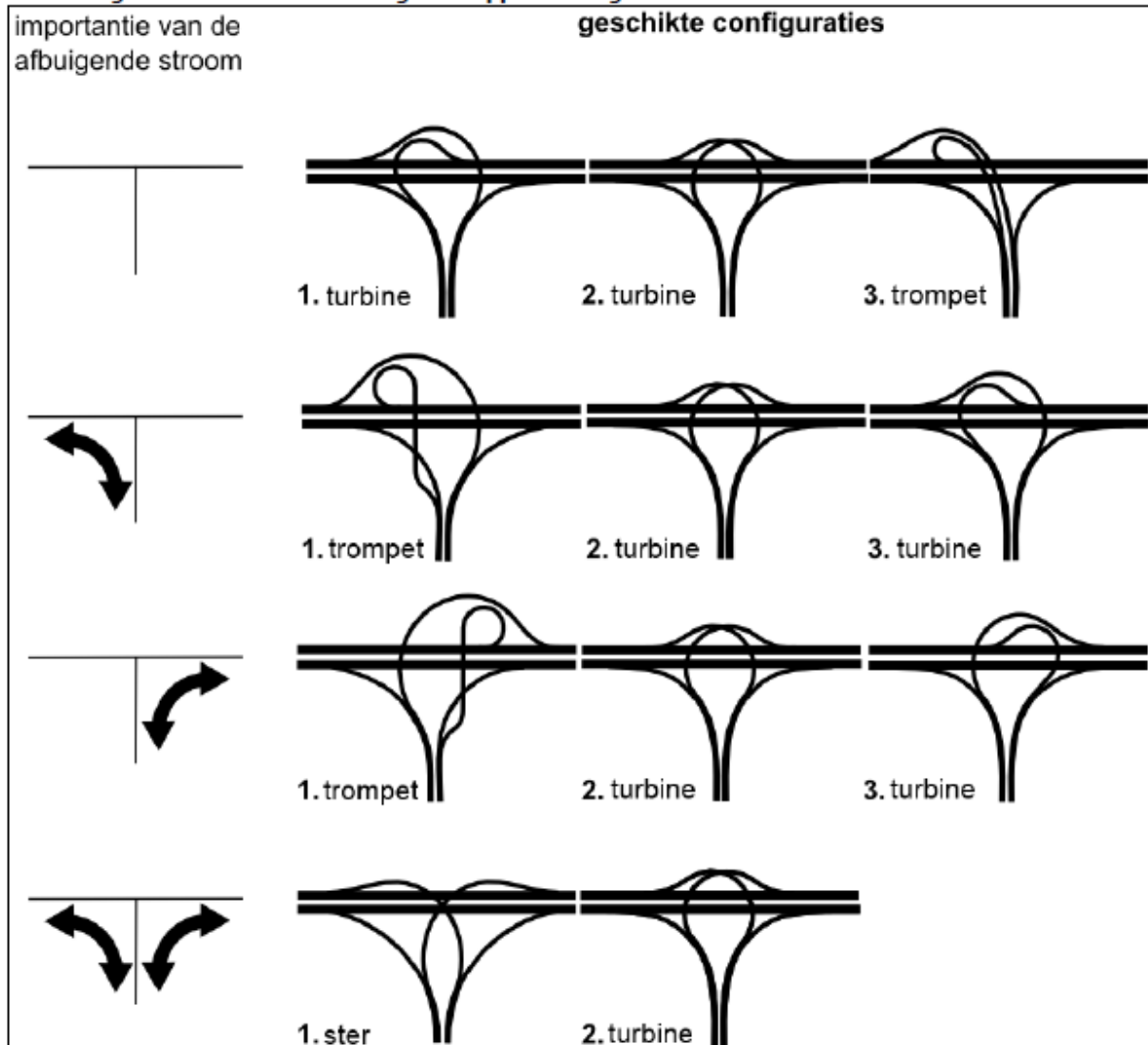
RSW dat een overgang van weg categorie plaatsvindt, namelijk tussen een autosnelweg en een RSW. De ROA stelt hiervoor echter geen strengere eisen aan het knooppuntontwerp, omdat de overgang in weg categorie direct bij de gebruiker zal opvallen bij het oprijden van het wegvak (ROA, 2019).

De standaard knooppuntconfiguraties uit de ROA voor driearmige en vierarmige knooppunten zijn in Figuur 72 en Figuur 73 weergegeven. In de ROA zijn deze configuraties opgenomen in afbeelding 4.3 en 4.5.



Figuur 72: Afbeelding 4.3 uit de ROA met standaard vierarmige knooppuntconfiguraties (ROA, 2019)

afbeelding 4.5 Standaard driearmige knooppuntconfiguraties

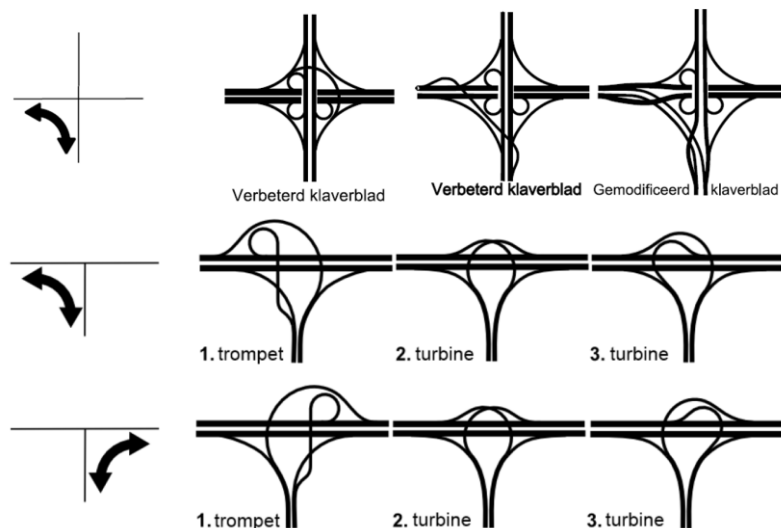


Figuur 73: Afbeelding 4.5 uit de ROA met standaard driearmige knooppuntconfiguraties (ROA, 2019)

In de ROA worden de knooppuntconfiguraties verdeeld naar de importantie van afbuigende relaties. Zo kan per knooppunt verschillen hoeveel (semi)directe verbindingen nodig zijn (variërend van nul tot vier). Voor de Harmsenknoop heeft enkel de verkeersstroom N57 ↔ Thomassentunnel een (semi)directe verbinding nodig, terwijl voor de overige verkeersstromen indirecte verbindingen volstaan (paragraaf 6.1).

Omdat de Harmsenknoop eigenlijk vier armen heeft (A15 West, Calandbrug, N57 en Thomassentunnel), maar de Calandbrug en de Thomassentunnel parallel liggen aan elkaar, wordt in eerste instantie zowel gekeken naar drie- als vierarmige knooppuntconfiguraties. De reden hiervoor is dat de T-vorm van de driearmige configuraties wellicht beter in de situatie zal passen. Indien een driearmige standaardconfiguratie als basis wordt genomen, dient deze vervolgens uitgebreid te worden met verbindingen richting de Calandbrug, zodat het ontwerp alle verkeersstromen uit het programma van eisen accommodeert.

In Figuur 74 worden de mogelijke drie- en vierarmige configuraties uit de ROA gepresenteerd, waarbij één verkeersstroom een (semi)directe verbinding heeft.

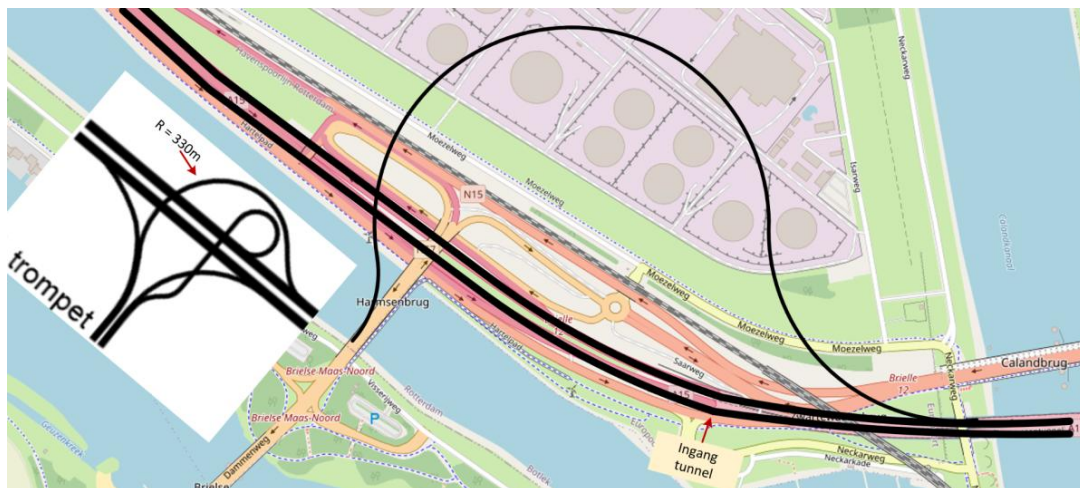


Figuur 74: Overzicht drie- en vierarmige knooppuntconfiguraties uit de ROA met één (semi)directe verbinding (ROA, 2019)

De keuze voor de knooppuntvorm voor het herontwerp van de Harmsenknoop is afhankelijk van de beschikbare ruimte in de omgeving en de benodigde ruimte per configuratie. Uit de randvoorwaarden volgt namelijk dat het knooppunt tussen het Hartelkanaal en de opslagterminals van de Haven van Rotterdam moet passen, waarbij ook de Moezelweg en Havenspoorlijn in acht worden genomen.

In Tabel 5.12 van de ROA is een overzicht van de minimale boogstralen bij verschillende ontwerpsnelheden en verkanting gepresenteerd. Aan de hand van deze tabel en op basis van de ontwerpsnelheden van de verbindingswegen op de Harmsenknoop kan een inschatting van de boogstralen worden gemaakt. Een indirecte verbinding heeft een ontwerpsnelheid van 30 of 50 km/h, terwijl bij een semidirecte verbinding de snelheden 50 of 70 km/h worden gehanteerd. Een directe verbinding is mogelijk voor 70 of 90 km/h (ROA, 2019).

Tabel 5.12 van de ROA laat zien dat verbindingen met een ontwerpsnelheid van 90 km/h een boogstraal van meer dan 300 meter nodig heeft. Vanwege de beperkte ruimte tussen het Hartelkanaal en de opslagterminals vallen knooppuntconfiguraties met een fly-over met een boogstraal van meer dan 300 meter af voor het herontwerp van de Harmsenknoop. Figuur 75 laat zien dat een fly-over met een boogstraal van 330 meter niet past in de omgeving van de Harmsenknoop, omdat deze over de opslagterminals gaat. Daarnaast is de boogstraal van 330 meter niet aansluitbaar op de huidige tunnelmond van de Thomassentunnel. Dit betekent dat de meest linker knooppuntconfiguraties in elke rij van Figuur 74 niet geschikt zijn voor de Harmsenknoop.

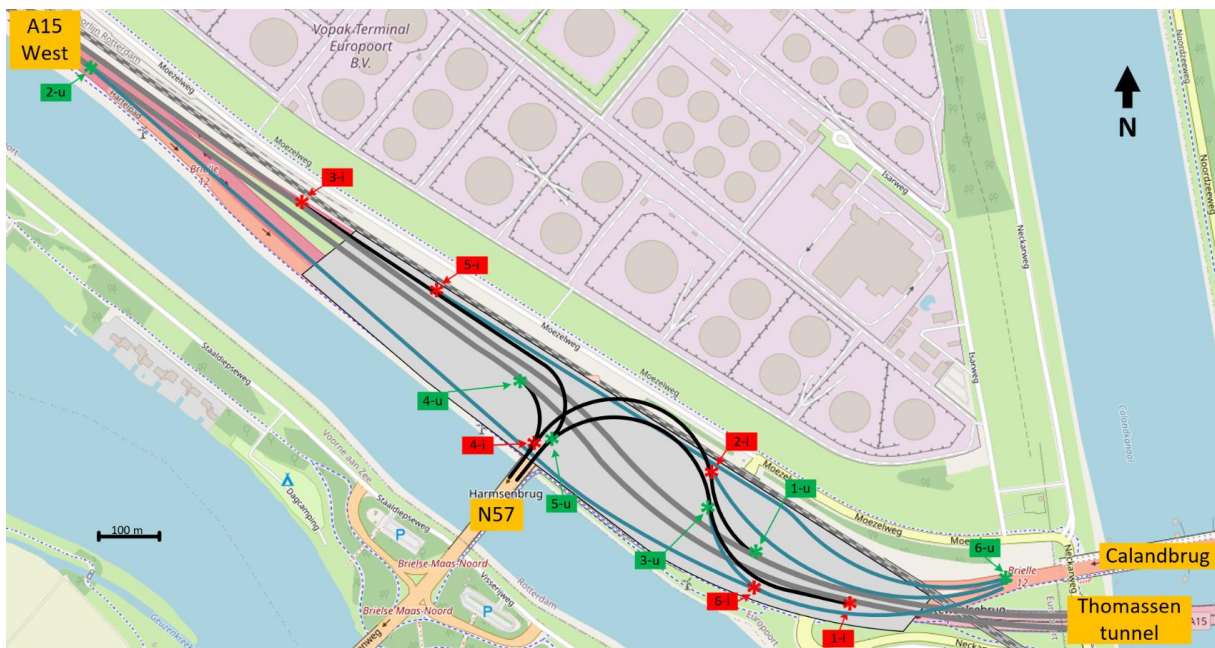


Figuur 75: Fly-over met een boogstraal van 330 meter gaat over opslagterminals en sluit niet aan op de snelweg voor de tunnel. Deze configuratie valt daarmee buiten de randvoorwaarden.

Bijlage 11: Ligging van discontinuïteiten ideale ontwerp

Met behulp van de viltstiftschets van het ideale ontwerp kan de ligging van de verschillende discontinuïteiten op het knooppunt in kaart worden gebracht. Volgens de Richtlijnen Ontwerp Autosnelwegen (ROA) is een discontinuïteit een overgang tussen twee verschillende wegvakken, waarbij rijbanen samenkomen of uit elkaar gaan of waarbij een vermeerdering of vermindering van het aantal rijstroken plaatsvindt (ROA, 2019).

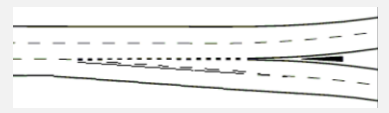
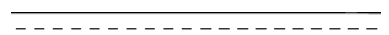
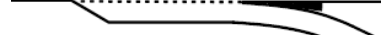


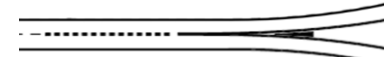
In Figuur 77 is een overzicht weergegeven van de locatie en labels van de verschillende discontinuïteiten van het ideale ontwerp. Hierbij verwijzen de labels 1-i, 2-i, enzovoorts naar de invoeringen en samenvoelingen, terwijl 1-u, 2-u, enzovoorts verwijzen naar de uitvoeringen en splitsingen van rijbanen. In Tabel 44 is daarnaast voor elke discontinuïteit het type weergegeven, met daarbij het aantal rijstroken van de doorgaande rijbaan en het aantal rijstroken van de invoegende, uitvoegende, samenkomende of splitsende rijbanen. Daarnaast is in de laatste kolom van Tabel 44 een principeschets van de discontinuïteiten weergegeven.



Figuur 77: Ligging van de discontinuïteiten van de ideale ontwerpvariant

Tabel 44: Overzicht discontinuïteiten voor het ideale ontwerp van de Harmsenknop

Discontinuïteit	Type	Doorgaande rijstroken	In- of uitvoegende, samenkomende of splitsende rijstroken	Principeschets op basis van mogelijkheden volgens de ROA (ROA, 2019)
1-i	Samenvoeging en rijstrook beëindiging	2	2	
2-i	Invoeging	2	1	
3-i	Invoeging	2	1	
4-i	Invoeging	2	1	
5-i	Invoeging	1	1	
6-i	Samenvoeging	1	1	

1-u	Splitsing	2	2	
2-u	Uitvoeging	2	1	
3-u	Uitvoeging	2	1	
4-u	Uitvoeging	2	1	
5-u	Splitsing	1	2	
6-u	Splitsing	1	1	

Discontinuïteiten 1-i en 1-u vallen onder het type samenvoeging of splitsing, in plaats van onder het type in- of uitvoeging, omdat de A15 in de Thomassentunnel drie rijstroken per rijrichting heeft en aan de westkant van de discontinuïteiten 1-i en 1-u verdergaat met twee rijstroken op elke rijbaan van de snelweg. 1-i bevat twee doorgaande en twee samenvoegende rijstroken. Eén van de samenvoegende rijstroken wordt vlak voor de tunnel beëindigd, zodat drie rijbanen doorgaan in de tunnel. 1-u is daarnaast een splitsing met een extra tapervormige uitvoeging.

Samenvoeging 6-i zorgt ervoor dat het laatste wegvak van de verbindingsweg richting de Calandbrug uit twee rijstroken bestaat. Dit is mogelijk doordat het ideale ontwerp geen wegvak vanaf de rotonde bij de Moezelweg heeft, omdat de rotonde wordt verwijderd in het ideale ontwerp. Aangezien de Calandbrug momenteel uit 2x2 rijstroken bestaat, kan discontinuïteit 6-i als een samenvoeging worden gerealiseerd in plaats van een invoeging.

Splitsing 5-u is een uitzonderlijke discontinuïteit met een splitsing naar 1+2 rijstroken, die volgens paragraaf 4.6.7 van de ROA nooit de voorkeur heeft boven een splitsing naar 2+1 rijstroken. De reden hiervoor is dat het wordt gezien als een situatie waarbij verkapt aan de linkerkant wordt uitgevoerd (ROA, 2019). De splitsing naar 1+2 rijstroken is volgens de ROA acceptabel op niet-hoofdrijbanen, indien bewegwijzering met duidelijke informatie over de naderende discontinuïteit wordt toegepast. Daarnaast moet de rijbaan aan de linkerkant van de splitsing doorgaan met dezelfde ontwerpsnelheid en wegcategorie. Voor de situatie op de Harmsenknoop bevindt deze splitsing zich tussen de N57 en de A15 met als gevolg dat de wegcategorie van een regionale stroomweg overgaat in een autosnelweg. Deze overgang van wegcategorie gebeurt echter 750 meter verder stroomafwaarts dan de splitsing. Vanwege de beperkte ruimte op de Harmsenknoop en het veranderen van de wegcategorie na 750 meter, is besloten om de 1+2 splitsing toe te passen voor discontinuïteit 5-u. Hoewel in dit onderzoek de eerste resultaten van de verkeersveiligheids- en doorstromingsaspecten van deze discontinuïteit worden geanalyseerd met de microsimulatie, zoals beschreven in Hoofdstuk 10 tot en met 12, is het belangrijk te vermelden dat de gevolgen op het gebied van de werklust van de bestuurder en de verkeersveiligheid nader worden onderzocht in een vervolgonderzoek.

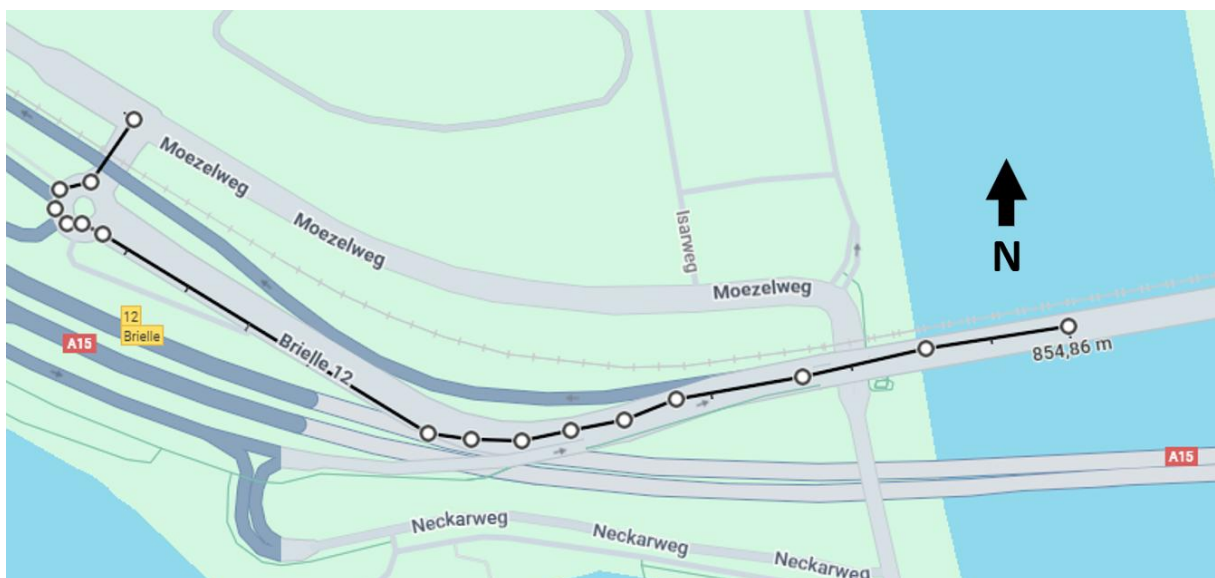
De lengtes van in- en uitvoegstroken zijn afhankelijk van de benodigde acceleratie- en deceleratielengte. Hiervoor is volgens paragraaf 6.1 van de ROA het bijbehorende hellingspercentage noodzakelijk om de benodigde lengtes te berekenen. Het verticale alignment en bijbehorende hellingspercentages worden in het Elementair Ontwerp (Hoofdstuk 7) uitgewerkt, waardoor de lengtes van de in- en uitvoegstroken pas na paragraaf 7.2 kunnen worden berekend.

Bijlage 12: Omreisroutes naar de Moezelweg

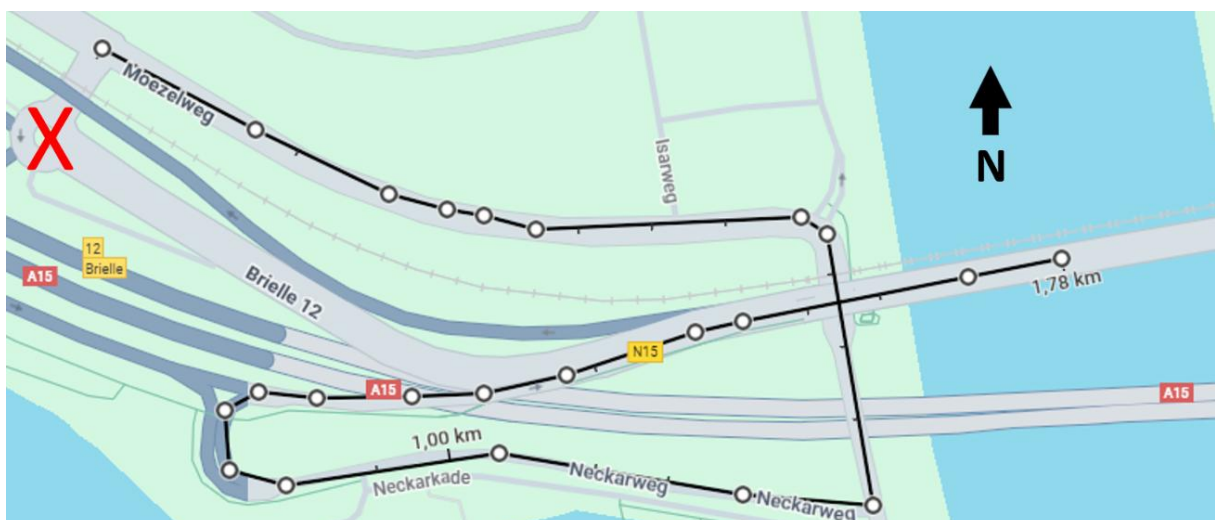
In deze bijlage worden de omreisroutes naar de Moezelweg geanalyseerd wanneer de aansluiting met de Harmsenknoop wordt verwijderd in het nieuwe ontwerp. In het huidige ontwerp van de Harmsenknoop is het mogelijk om via de rotonde van de Moezelweg naar de Calandbrug en N57 te gaan. Daarnaast is het door de rotonde mogelijk om van de Calandbrug en N57 naar de Moezelweg te rijden. Deze vier verbindingen moeten in het nieuwe ontwerp met omreisroutes worden gefaciliteerd. Deze omreisroutes worden hieronder beschreven.

Omreisroute 1: Moezelweg → Calandbrug

In het nieuwe ontwerp, zowel in de ideale als realistische variant, wordt de rotonde nabij de Moezelweg verwijderd, maar blijft de aansluiting tussen de Neckarweg en de N15 (de weg over de Calandbrug) bestaan. Dit betekent dat de omreisroute van de Moezelweg naar de Calandbrug via de Neckarweg kan worden gerealiseerd. Figuur 78 geeft de huidige route tussen de Moezelweg en Calandbrug weer en in Figuur 79 wordt de nieuwe omreisroute weergegeven in het geval dat de rotonde bij de Moezelweg wordt weggehaald.



Figuur 78: Huidige route van de Moezelweg naar de Calandbrug met bijbehorende afstand (Google Maps, 2025)



Figuur 79: Omreisroute van de Moezelweg naar de Calandbrug met bijbehorende afstand wanneer de rotonde bij de Moezelweg wordt weggehaald (Google Maps, 2025)

De huidige route heeft een afstand van 855 meter, terwijl de nieuwe route via de Neckarweg een afstand van 1.780 meter zal bedragen. Dit betekent dat de bijbehorende omrijfactor gelijk is aan $\frac{1780}{855} \approx 2,08$.

Omreisroute 2: Moezelweg → N57

Wanneer de rotonde bij de Moezelweg in het nieuwe ontwerp wordt weggehaald, zijn twee omreisroutes van de Moezelweg naar de N57 mogelijk. De eerste route gaat via de Neckarweg en Calandbrug, waarna bij de Merseyweg en Droespolderweg wordt omgekeerd om via de Calandbrug en de nieuwe verbindingsweg van het ideale knooppunt naar de N57 te rijden. Deze route is in Figuur 81 weergegeven, terwijl de huidige route van de Moezelweg naar de N57 in Figuur 80 is weergegeven.



Figuur 80: Huidige route van de Moezelweg naar de N57 met bijbehorende afstand (Google Maps, 2025)



Figuur 81: Omreisroute van de Moezelweg naar de N57 via de Calandbrug met bijbehorende afstand (Google Maps, 2025)

Bij de tweede omreisroute moet naar het westen worden gereden over de Moezelweg, waarna bij de aansluiting van de Merwedeweg via de A15 (West) wordt teruggereden om vervolgens via de nieuwe verbindingsweg van het ideale ontwerp naar de N57 te rijden. Deze omreisroute is in Figuur 82 weergegeven.

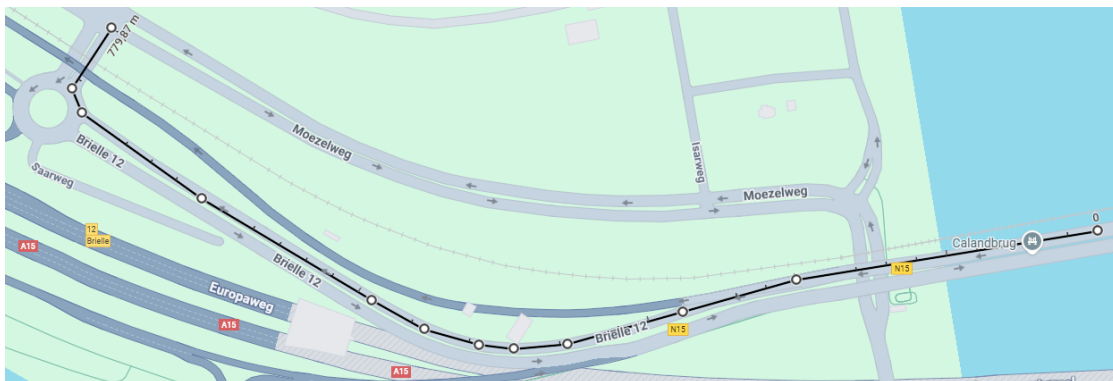
De huidige route heeft een afstand van 1,0 kilometer, terwijl de nieuwe route via de Calandbrug een afstand van 5,03 kilometer zal bedragen en de nieuwe route via de A15 West zal 7,53 kilometer bedragen. De bijbehorende omrijfactoren zijn respectievelijk $\frac{5,03}{1,0} \approx 5,03$ en $\frac{7,53}{1,0} \approx 7,53$. Dit betekent dat de omreisroute via de Calandbrug korter is.



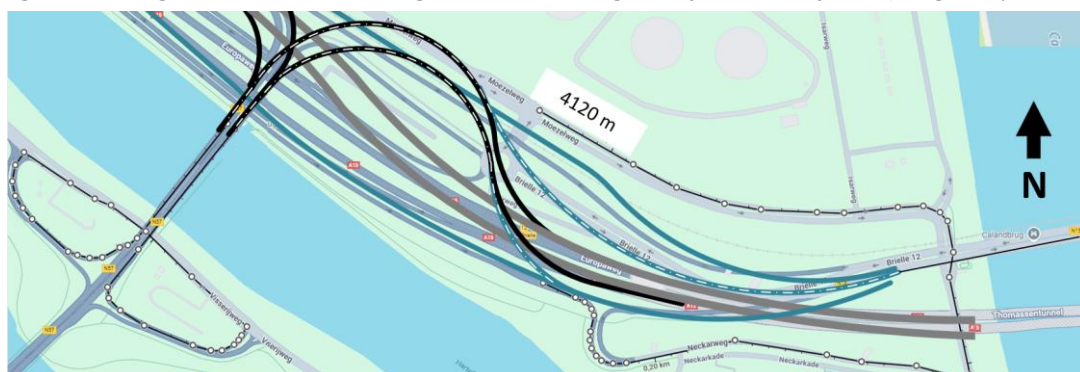
Figuur 82: Omreisroute van de Moezelweg naar de N57 via de A15 West met bijbehorende afstand (Google Maps, 2025)

Omreisroute 3: Calandbrug → Moezelweg

De omreisroute van de Calandbrug naar de Moezelweg zal via de N57 gaan, waarbij bij de Staaldiepseweg wordt gekeerd, zodat de Moezelweg via de verbindingsweg van het ideale ontwerp en de Neckarweg kan worden bereikt. De huidige route van de Calandbrug naar de Moezelweg is weergegeven in Figuur 83 en de nieuwe route via de Calandbrug is weergegeven in Figuur 84.



Figuur 83: Huidige route van de Calandbrug naar de Moezelweg met bijbehorende afstand (Google Maps, 2025)

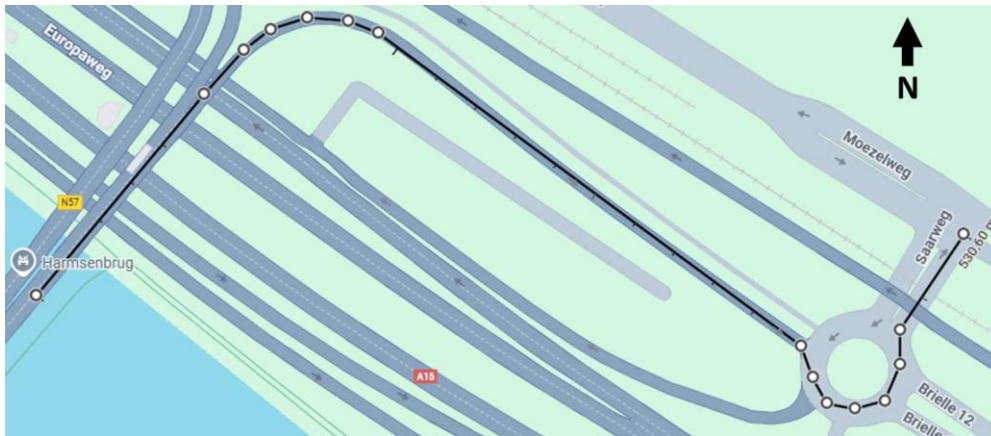


Figuur 84: Omreisroute van de Calandbrug naar de Moezelweg via de N57 met bijbehorende afstand (Google Maps, 2025)

De huidige route heeft een afstand van 780 meter, terwijl de nieuwe route via de N57 een afstand van 4.120 meter zal bedragen. Dit betekent dat de bijbehorende omrijfactor gelijk is aan $\frac{4120}{780} \approx 5,28$.

Omreisroute 4: N57 → Moezelweg

De omreisroute van de N57 naar de Moezelweg zal via de nieuwe verbindingsweg van het ideale ontwerp en de Neckarweg lopen. De huidige route van de N57 naar de Moezelweg is weergegeven in Figuur 85 en de nieuwe route via de Calandbrug is weergegeven in Figuur 86.



Figuur 85: Huidige route van de N57 naar de Moezelweg met bijbehorende afstand (Google Maps, 2025)



Figuur 86: Omreisroute van de N57 naar de Moezelweg via de Neckarweg met bijbehorende afstand (Google Maps, 2025)

De huidige route heeft een afstand van 530 meter, terwijl de nieuwe route via de Calandbrug een afstand van 1.840 meter zal bedragen. Dit betekent dat de bijbehorende omrijfactor gelijk is aan $\frac{1840}{530} \approx 3,47$.

Conclusie over de grootte van de omrijfactoren

De omrijfactoren voor de omreisroutes als gevolg van het verwijderen van de aansluiting tussen de Harmensenknoop en de Moezelweg variëren tussen 2,08 en 5,28. Hoewel de lengtes van de omreisroutes minder dan vijf kilometer bedragen, is het aan Rijkswaterstaat om te bepalen of dit acceptabel is. Daarom wordt aanbevolen een vervolgonderzoek uit te voeren naar de effecten op het onderliggende wegennet, inclusief de mogelijke verplaatsing van verkeersstromen en het ontstaan van nieuwe knelpunten op andere locaties. Deze aanbeveling is opgenomen in paragraaf 13.5 van de Discussie.

Bijlage 13: Overzicht van tabellen uit de ROA

In deze bijlage worden de gebruikte tabellen uit de Richtlijnen Ontwerp Autosnelwegen weergegeven (ROA, 2019).

tabel 5.9 Minimale en maximale lengte horizontale rechtstand

Type rijbaan		minimale lengte		maximale lengte
		tussen gelijkgerichte bogen	tussen tegengesteld gerichte bogen	
Hoofdbaan	Maatvoering	480 m	240 m	2.400 m
Niet-hoofdbaan op basis van ontwerp-snelheid	120 km/u	480 m	240 m	2.400 m
	90 km/u	360 m	180 m	1.800 m
	70 km/u	280 m	140 m	1.400 m
	50 km/u	200 m	100 m	1.000 m

tabel 5.11 Minimale horizontale boogstraal in hoofdbanen

situatie	minimale horizontale boogstraal hoofdbaan	
	Autosnelweg	Stadsautosnelweg
rechte tracégedeelten toe te passen ter vervanging van rechtstanden	40.000 m	40.000 m
gebogen tracégedeelten tegenverkanting afschot / verkanting (2,5 %)	4.000 m	2.000 m
	1.500 m	700 m
<ul style="list-style-type: none"> • bij knooppunten en aansluitingen <ul style="list-style-type: none"> ◦ toe te passen ter vervanging van rechtstanden ◦ ter voorkoming parallax bij waarneming informatie boven rijbaan* • discontinuïteiten in linksdraaiende boog ten behoeve van overzichtelijkheid, spiegelgebruik** en ter voorkoming misleiding • discontinuïteiten in rechtsdraaiende boog ten behoeve van overzichtelijkheid, spiegelgebruik** en ter voorkoming misleiding 	40.000 m	40.000 m
	3.000 m	3.000 m
	4.000 m	4.000 m
	3.000 m	3.000 m

tabel 5.12 Minimale horizontale boogstraal niet-hoofdbanen in relatie tot de verkanting

situatie	minimale boogstraal per ontwerp-snelheid voor niet-hoofdbanen			
	120 km/u*	90 km/u	70 km/u	50 km/u
tegenverkanting	4.000 m	n.v.t**	n.v.t**	n.v.t**
2,5 % verkanting	1.500 m	700 m	350 m	n.v.t***
3,0 % verkanting	1.350 m	630 m	315 m	n.v.t***
3,5 % verkanting	1.200 m	560 m	n.v.t***	n.v.t***
4,0 % verkanting	1.050 m	490 m	n.v.t***	n.v.t***
4,5 % verkanting	900 m	420 m	n.v.t***	n.v.t***
5,0 % verkanting	750 m	350 m	180 m	85 m
5,5 % verkanting		340 m	175 m	85 m
6,0 % verkanting		330 m	170 m	85 m
6,5 % verkanting			165 m	80 m
7,0 % verkanting			160 m	80 m

tabel 5.13 Bovengrenzen toepassing overgangsboog

Type rijbaan		overgangsboog noodzakelijk indien
Hoofdbaan	Bovengrens	$R_{1,2} < 4.000$ m
Niet-hoofdbaan op basis van ontwerp-snelheid	120 km/u	$R_{1,2} < 4.000$ m
	90 km/u	$R_{1,2} < 2.000$ m
	70 km/u	$R_{1,2} < 800$ m
	50 km/u	$R_{1,2} < 300$ m

tabel 5.14 Onder en bovengrenzen clothoïdeparameter A

Type rijbaan		ondergrens clothoïdeparameter A		bovengrens
		zichtbaarheid	comfort	
Hoofdbaan	Maatvoering	1/3 R ₁	n.v.t.	R ₁
Niet-hoofdbaan op basis van ontwerp-snelheid	120 km/u	1/3 R ₁	270	R ₁
	90 km/u	1/3 R ₁	175	
	70 km/u	1/3 R ₁	95	
	50 km/u	1/3 R ₁	60	

tabel 5.16 Richtwaarden verticale rechtstand

Type rijbaan		standaardwaarden		bij grote kunstwerken ¹²	
		maximaal hellingspercentage	maximale lengte	maximaal hellingspercentage	maximale lengte
Hoofdbaan	Maatvoering	3 %	1300 m	5 %	500 m
Niet hoofdbaan op basis van ontwerp-snelheid	120 km/u	3 %	1300 m	5 %	500 m
	90 km/u				
	70 km/u	4 %	700 m	6 %	350 m
	50 km/u			7 %	250 m

tabel 5.21 Horizontale minimumruimte

ontwerpsnelheid	ontwerpvoertuig	minimumruimte stilstaande voertuigen	minimumruimte rijdende voertuigen
		(breedte ontwerpvoertuig)	(breedte ontwerpvoertuig + restbreedte)
120 km/u	personenauto	1,83 m	2,83 m
	vrachtauto	2,55 m	3,05 m
90 km/u	personenauto	1,83 m	2,83 m
	vrachtauto	2,55 m	3,05 m
70 km/u	personenauto	1,83 m	2,57 m
	vrachtauto	2,55 m	3,05 m
50 km/u	personenauto	1,83 m	2,07 m
	vrachtauto	2,55 m	2,80 m

tabel 5.24 Verticaal profiel van vrije ruimte

ontwerpvoertuig	minimumruimte stilstaand voertuig	marge voor rijdend voertuig	vrije ruimte	overlagingsmarge	verticaal profiel van vrije ruimte
personenauto	4,00 m	0,20 m	0,30 m	0,10 m	4,60 m
vrachtauto					

tabel 6.6 - turbulentielenktes niet-hoofdbanen*

Van / Naar (meetpunt)	invoeging (punt puntstuk)	samenvoeging (punt puntstuk)	uitvoeging (punt puntstuk of punt taper)	splitsing (begin blokmarkering)	weefvak (punt eerste puntstuk of punt eerste taper)	strookbeëindiging (begin verdrijfstrepen)
invoeging (punt puntstuk)	450 m	450 m	825 m	450 m	825 m	825 m
samenvoeging (punt puntstuk of punt taper)	450 m	450 m	825 m	450 m	825 m	825 m
uitvoeging (punt puntstuk)	150 m	150 m	525 m	150 m	525 m	525 m
splitsing (punt puntstuk)	150 m	150 m	525 m	150 m	525 m	525 m
weefvak (punt tweede puntstuk of punt tweede taper)	150 m	150 m	525 m	150 m	525 m	525 m
strookbeëindiging (einde verdrijfstrepen)	375 m	375 m	750 m	375 m	750 m	750 m

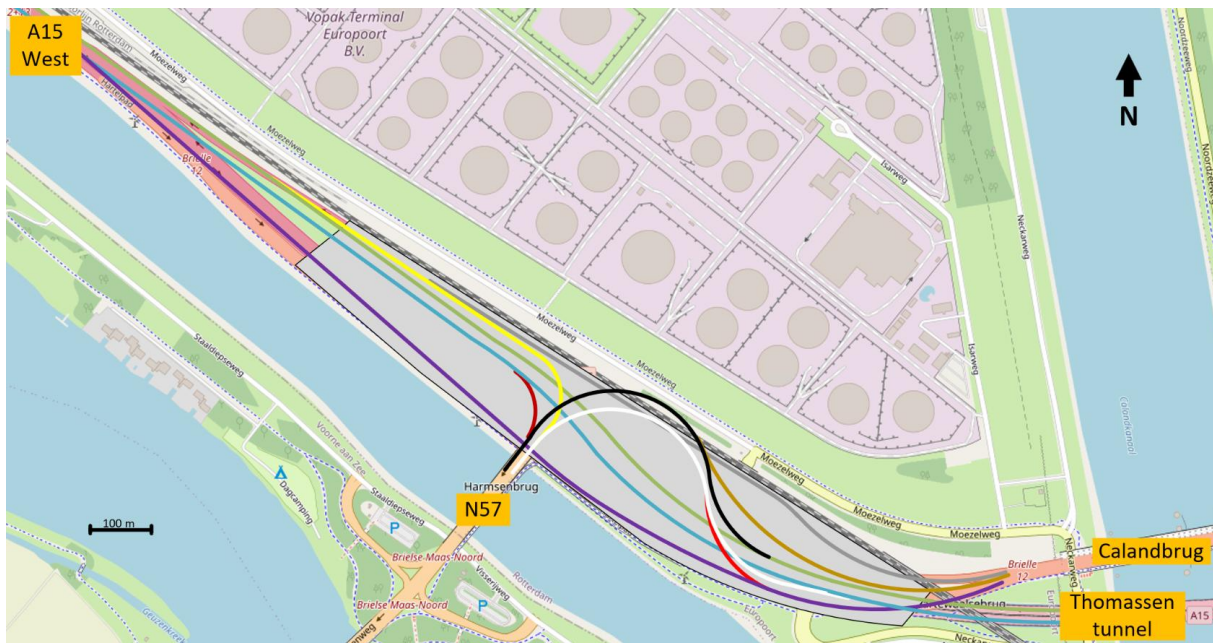
* Bij de discontinuïteit 'extra rijstrook' is geen sprake van relevante turbulentie.

tabel 9.6 Minimale afstanden tussen discontinuïteit buiten de tunnel en tunnelmond

type	locatie	hoofdbanen*	parallel of rangeerbanen * *	meetpunten***
invoeging	voor de tunnel	575 m (750 m)	430 m (565 m)	puntstuk - tunnelingang
	na de tunnel	180 m	120 m	tunneluitgang - puntstuk
uitvoeging	voor de tunnel	275 m (400 m)	210 m (300 m)	puntstuk - tunnelingang
	na de tunnel	480 m	345 m	tunneluitgang - puntstuk
samenvoeging	voor de tunnel	375 m	285 m	puntstuk - tunnelingang
	na de tunnel	180 m	120 m	tunneluitgang - puntstuk
splitsing	voor de tunnel	275 m (400 m)	210 m (300 m)	puntstuk - tunnelingang
	na de tunnel	900 m	675 m	tunneluitgang - puntstuk
weefvak	voor de tunnel	390 m	295 m	puntstuk - tunnelingang
	na de tunnel	180 m	120 m	tunneluitgang - puntstuk
strookbeëindiging	voor de tunnel	400 m	300 m	einde rijstrook - tunnelingang
	na de tunnel	295 m	205 m	tunneluitgang - eerste aankondiging rijstrookbeëindiging
extra rijstrook****	voor de tunnel	200 m (400 m)	150 m (300 m)	begin extra rijstrook - tunnelingang
	na de tunnel	105 m	65 m	tunneluitgang - begin extra rijstrook

Bijlage 14: Uitwerking van het horizontaal alignment van het ideaal ontwerp

In deze bijlage wordt in detail beschreven hoe het horizontale alignment van de ideale ontwerpvariant is uitgewerkt. Hiervoor hebben de verbindingswegen verschillende kleuren gekregen, zodat ze duidelijk uit elkaar gehouden kunnen worden. De viltstiftschets van de ideale ontwerpvariant met verschillende kleuren voor de verbindingswegen is weergegeven in Figuur 87.



Figuur 87: Viltstiftschets ideale ontwerpvariant met verschillende kleuren voor de tien verkeersstromen

Boogstralen en verkanting

De gebruikte boogstralen voor het ideale ontwerp van de Harmsenknoop zijn bepaald op basis van de Richtlijnen Ontwerp Autosnelwegen (ROA). De boogstralen zijn gekozen aan de hand van de ontwerpsnelheden en bijbehorende minimaal toegestane boogstralen volgens de zichteisen uit de ROA. Omdat de Harmsenknoop geen zich belemmerende objecten binnen het knooppunt bevat, worden de minimaal toegestane boogstralen uit Tabel 5.12 van de ROA gebruikt. Tabel 45 geeft een overzicht van de verschillende verbindingswegen, bijbehorende kleur, ontwerpsnelheid, verkanting en de gekozen boogstraal. Vanwege de beperkte beschikbare ruimte is bij de keuze voor de boogstralen steeds de minimaal toegestane boogstraal gekozen, zodat het ideale ontwerp conform de richtlijnen is en daarnaast binnen de harde randvoorwaarden blijft.

Tabel 45: Ideale ontwerp: overzicht van de ontwerpparameters en de gekozen boogstraal (ROA, 2019)

Verkeersstroom	Kleur	Ontwerpsnelheid	Verkanting	Boogstraal
A15 West → Calandbrug	Paars	90 km/h	2,5 %	675 m
A15 West → Thomassentunnel	Lichtblauw	120 km/h	5%	750 m
A15 West → N57	Roodbruin	50 km/h	6,5%	80 m
Calandbrug → A15 West	Grijs	90 km/h	6%	330 m
Calandbrug → N57	Goud	70 km/h	2,5%	400 m
N57 → Calandbrug	Rood	70 km/h	7%	160 m
N57 → Thomassentunnel	Wit	70 km/h	7%	160 m
N57 → A15 West	Geel	50 km/h	6,5%	80 m
Thomassentunnel → A15 West	Lichtgroen	120 km/h	5%	750 m
Thomassentunnel → N57	Zwart	70 km/h	7%	160 m

De verbindingswegen A15 West ↔ Calandbrug volgen zoveel mogelijk dezelfde route als in het huidige ontwerp van de Harmsenknoop, waardoor deze wegen voornamelijk bestaan uit rechtstanden en alleen voor de Calandbrug een boog bevatten. De huidige snelheid op deze zogenoemde stadsautosnelwegen is 80 km/h. Omdat Tabel 5.12 van de ROA enkel boogstralen geeft voor 50, 70, 90 of 120 km/h, wordt een ontwerpsnelheid van 90 km/h gebruikt. De gekozen boogstralen volgen uit de huidige ligging van deze verbindingswegen.

Zoals beschreven in het Functioneel Ontwerp sluiten de verbindingswegen Calandbrug ↔ N57 aan op de verbindingswegen Thomassentunnel ↔ N57. Dit betekent dat de bijbehorende gouden verbindingsweg op de zwarte verbindingsweg wordt aangesloten, waardoor het verkeer van de Calandbrug naar de N57 de gouden route en een deel van de zwarte verbindingsweg volgt. Het verkeer van de N57 naar de Calandbrug volgt eerst een deel van de witte verbindingsweg en vervolgens wordt de rode verbindingsweg met een boogstraal van 160 meter aangesloten op de paarse verbindingsweg van de A15 West → Calandbrug.

Overgangsbogen

Om een geleidelijke overgang tussen een rechtstand en een boog of twee opeenvolgende bogen te realiseren, wordt een overgangsboog toegepast. Een overgangsboog zorgt onder andere voor een geleidelijke stuurverdraaiing en een vloeiende vormgeving van het wegontwerp in bogen (ROA, 2019). Daarnaast maakt de overgangsboog deel uit van de acceleratielengte van een invoegstrook, waardoor de lengte van de overgangsboog moet worden meegenomen bij het bepalen van de totale lengte van de invoegstrook.

Een overgangsboog moet worden toegepast bij bogen met een boogstraal kleiner dan 300 meter voor een ontwerpsnelheid van 50 km/h, kleiner dan 800 meter voor 70 km/h, kleiner dan 2000 meter voor 90 km/h en kleiner dan 4000 meter voor 120 km/h (ROA, 2019). Dit betekent dat overgangsbogen nodig zijn tussen elke verbinding van een rechtstand en een boog en elke verbinding tussen twee opeenvolgende bogen op de Harmsenknoop.

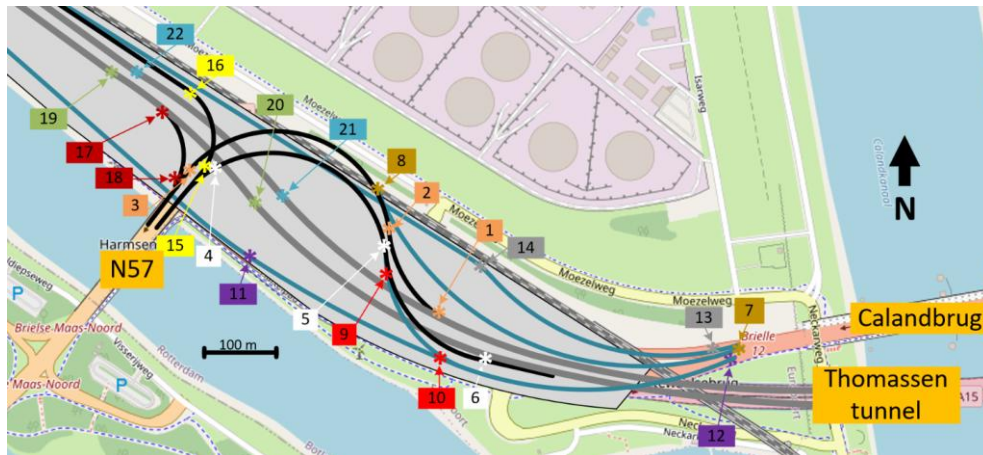
Als overgangsboog wordt een clothoïde toegepast, waarbij de clothoïdeparameter A wordt bepaald aan de hand van eisen vanuit het zicht en comfort. Parameter A wordt zo klein mogelijk gekozen om de boogherkenning te verduidelijken. Tabel 5.14 van de ROA geeft de boven- en ondergrenzen van A, waarbij voor de minimale waarde van de A geldt dat de hoogste waarde van de zicht- en comforteisen maatgevend is.

Daarnaast blijkt uit paragraaf 5.2.3 van de ROA dat de clothoïdeparameter A gelijk is aan $\frac{1}{3} * R$ wanneer de boog een lagere ontwerpsnelheid heeft dan het voorgaande weggedeelte. In andere gevallen volgt de waarde van A uit: $\max(\frac{1}{3} * R; \text{comforteisen})$. Hierbij gelden voor de volgende comforteisen:

- 120 km/h: A = 270
- 90 km/h: A = 175
- 70 km/h: A = 95
- 50 km/h: A = 60

Wanneer de waarde van de clothoïdeparameter A is bepaald, wordt de benodigde lengte van de overgangsboog berekend aan de hand van de formule: $A^2 = R * L$. Waarbij R de boogstraal is en L de lengte van de overgangsboog. Lengte L loopt vanaf de boog tot aan het nulpunt (waar geldt R = oneindig). Het nulpunt is het beginpunt van de rechtstand en bij twee tegengestelde horizontale bogen zijn twee tegengestelde overgangsbogen noodzakelijk, waarbij het nulpunt het punt van de overgang van de ene naar de andere overgangsboog is. De totale lengte van de overgangsboog bij tegengestelde bogen is zodoende de som van de twee tegengestelde overgangsbogen.

De overgangsbogen op de Harmsenknoop zijn gelabeld en de ligging van de overgangsbogen in de ideale ontwerpvariant is weergegeven in Figuur 88. Tabel 46 geeft een overzicht van de berekening van de totale lengte van de overgangsbogen op de Harmsenknoop. Hierbij zijn de overgangsbogen tussen twee tegengestelde bogen opgesplitst in overgangsboog a en b en is de totale lengte van de overgangsboog tussen de tegengestelde bogen de som van overgangsbogen a en b.



Figuur 88: Overzicht ligging overgangsbogen ideaal ontwerp

Tabel 46: Ideale ontwerp: overzicht van de eigenschappen en berekening van de overgangsbogen op de Harmsenknoop

Overgangsboog	Snelheidsafname t.o.v. vorige wegvak?	Boogstraal (R)	$\frac{1}{3} * R$	Comfort-eis	Gekozen waarde voor A	Lengte overgangsboog (L)	Totale lengte overgangsboog
1, 4	Ja	160	53,33	-	53,33	17,78	17,78
2a, 5a, 9a	Nee	160	53,33	95	95,00	56,41	112,81
2b, 5b, 9b	Nee	160	53,33	95	95,00	56,41	
3, 6, 10	Nee	160	53,33	95	95,00	56,41	56,41
7	Ja	400	133,33	-	133,33	44,44	44,44
8a	Nee	400	133,33	95	133,33	44,44	100,85
8b	Nee	160	53,33	95	95,00	56,41	
11, 12	Nee	675	225,00	175	225,00	75,00	75,00
13, 14	Nee	330	110,00	175	175,00	92,80	92,80
15, 17	Ja	80	26,67	-	26,67	8,89	8,89
16, 18	Nee	80	26,67	60	60,00	45,00	45,00
19, 22	Nee	750	250,00	270	270,00	97,20	97,20
20a, 21a	Nee	750	250,00	270	270,00	97,20	194,40
20b, 21b	Nee	750	250,00	270	270,00	97,20	

Verkantingsovergang in overgangsbogen

Naast een geleidelijke overgang tussen de rechtstanden en (opeenvolgende) bogen, zorgt een overgangsboog ook voor een geleidelijke overgang van de verkanting. Dit wordt niet verder uitgewerkt in dit onderzoek, omdat deze ontwerpaspecten niet in de microsimulatie kunnen worden ingevoerd. Het wordt aangeraden om met een vervolgonderzoek te bepalen of de berekende lengtes van de overgangsbogen toereikend zijn voor de verkantingsovergang.

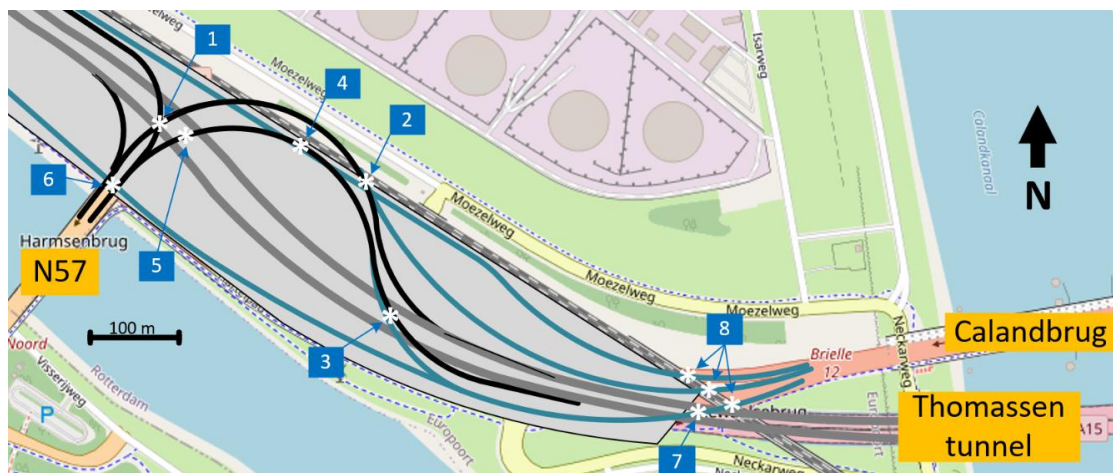
Zicht in bogen

Binnen de bogen op de Harmsenknoop bevinden zich geen zicht beperkende objecten, waardoor de gebruikte boogstralen volgens Tabel 5.12 van de ROA voldoen aan de zichteisen. Wel wordt aangeraden om een vervolgonderzoek te doen naar de ervaring en het daadwerkelijke zicht van de weggebruikers in de bogen van de Harmsenknoop, zodat de gevolgen hiervan kunnen worden geanalyseerd. Aandachtspunten zijn hierbij de in- en uitvoeringen die midden in de boog van de verbindingswegen N57 ↔ Thomassentunnel geplaatst zijn.

Bijlage 15: Uitwerking van het verticaal alignement van het ideaal ontwerp

Deze bijlage gaat in op de totstandkoming van de hellingspercentages van de wegvakken van het ideale ontwerp. Hierbij worden allereerst de ongelijkvloerse kruisingen en bijbehorende vrije ruimtes (hoogtes) geanalyseerd.

In Tabel 6 van het Functioneel Ontwerp is een eerste opzet van het verticale alignement weergegeven. Om de hellingspercentages van alle wegvakken van het ideale ontwerp van de Harmsenknoop te bepalen, zijn voor elke verbindingsweg de benodigde begin- en eindhoogte nodig. Daarnaast moeten op de punten waar verbindingswegen elkaar ongelijkvloers kruisen voldoende vrije ruimte (hoogte) tussen de verbindingswegen worden gecreëerd. Figuur 89 geeft een overzicht van de ligging en labels van de ongelijkvloerse kruisingen.

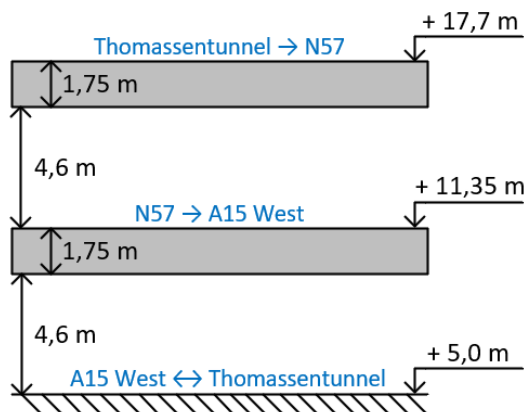


Figuur 89: Overzicht ligging van de ongelijkvloerse kruisingen van het ideale ontwerp

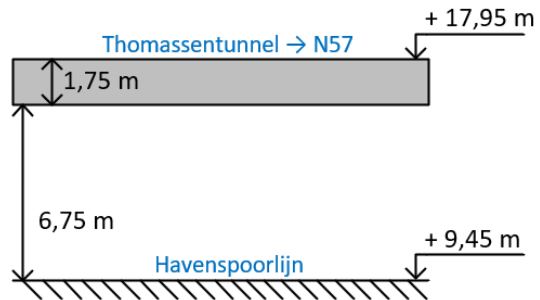
1. Thomassentunnel → N57: ongelijkvloerse kruising met verbindingsweg N57 → A15 West en met de snelweg de A15

Op ongelijkvloerse kruising 1 moeten drie verbindingswegen boven elkaar worden gerealiseerd, namelijk die van de Thomassentunnel → N57, N57 → A15 West en de snelweg de A15 (A15 West ↔ Thomassentunnel). De A15 volgt zoveel mogelijk de huidige hoogteligging en komt daarmee volgens het Algemeen Hoogtebestand Nederland (AHN) op +5,00 m boven NAP te liggen (AHN, z.d.). Uit Tabel 5.24 van de ROA volgt dat het verticale profiel van vrije ruimte voor voertuigen 4,60 meter bedraagt (ROA, 2019). Dit betekent dat de onderkant van de bovenliggende constructie op $+5,00 + 4,60 = +9,60$ meter komt te liggen. Voor de hoogte van de constructie van verhoogde verbindingswegen wordt aangenomen dat deze hetzelfde is als de huidige hoogte van de constructie van de Harmsenbrug en het naastgelegen viaduct over de A15. Dit betekent dat de constructie van de verbindingswegen wordt aangenomen op $+13,20 - 11,45 = 1,75$ meter, waarbij +13,20 m de huidige hoogte van de bovenkant van de Harmsenbrugconstructie is en de +11,45 m verwijst naar de huidige doorvaarhoogte, dus de onderkant van de constructie van de Harmsenbrug.

De bovenkant van de verbindingsweg N57 → A15 West komt daarmee op $+9,60 + 1,75 = +11,35$ meter te liggen. De verbindingsweg van de Thomassentunnel → N57 wordt boven de verbindingsweg van de N57 → A15 West gerealiseerd, zodat enerzijds de verbindingswegen elkaar niet gelijkvloers kruisen en zodat anderzijds extra hoogte wordt verkregen bij de ongelijkvloerse kruising met de Havenspoorlijn. De verbindingsweg Thomassentunnel → N57 ligt zodoende bij ongelijkvloerse kruising 1 op een hoogte van $+11,35 + 4,60 + 1,75 = +17,70$ meter. Figuur 90 geeft een overzicht van de hoogteliggingen bij ongelijkvloerse kruising 1.



Figuur 90: Hoogteliggingen bij ongelijkvloerse kruising 1



Figuur 91: Hoogteliggingen bij ongelijkvloerse kruising 2

2. Thomassentunnel → N57: ongelijkvloerse kruising met de Havenspoorlijn en met verbindingsweg Calandbrug → A15 West

Bij ongelijkvloerse kruising 2 moet de verbindingsweg Thomassentunnel → N57 boven de Havenspoorlijn en de verbindingsweg Calandbrug → A15 West worden gerealiseerd. Het verticale profiel van vrije ruimte van een trein is niet hetzelfde als de 4,60 meter voor voertuigen. Uit de ontwerpvoorschriften van ProRail volgt dat een minimale hoogte van 6,75 meter tot het bovenliggende bouwwerk en het spoor noodzakelijk is (ProRail, 2015). Daarnaast volgt uit deze ontwerpvoorschriften dat de sporen voor goederentreinen maximaal een helling van 0,5% mogen hebben.

De Havenspoorlijn ligt momenteel op +10,60 meter bij ongelijkvloerse kruising 2 en heeft bij de spoorbrug over de verbindingswegen van de Calandbrug (ongelijkvloerse kruisingen 8) een hoogte van +11,45 meter. De horizontale afstand tussen ongelijkvloerse kruising 2 en de spoorbrug is 400 meter. Bij een maximale helling van 0,5% kan het spoor ter hoogte van ongelijkvloerse kruising 2 maximaal op $+11,45 - 0,5 * \frac{400}{100} = +9,45$ meter hoogte liggen.

Dit betekent dat de verbindingsweg Thomassentunnel → N57 op een hoogte van $+9,45 + 6,75 + 1,75 = +17,95$ meter komt te liggen bij ongelijkvloerse kruising 2. Deze verbindingsweg gaat 155 meter westelijker ook het treinspoor over om de bocht naar de N57 af te maken. Op deze kruising wordt de verbindingsweg Thomassentunnel → N57 op een hoogte van +17,70 meter gelegd, zodat deze hoogte gelijk is aan de hoogte bij ongelijkvloerse kruising 1. Dit betekent dat het treinspoor op deze locatie op een hoogte van $+17,7 - 6,75 - 1,75 = +9,20$ meter komt te liggen. Dit is mogelijk omdat het spoor hier ten opzichte van de spoorbrug op maximaal $+11,45 - 0,5 * \frac{555}{100} = +8,68$ meter hoogte kan liggen.

Omdat de verbindingsweg Thomassentunnel → N57 bij ongelijkvloerse kruising 2 op een hoogte van +17,95 meter moet komen te liggen, is het noodzakelijk om rekening te houden met het maximale hellingspercentage voor verbindingswegen met een ontwerpsnelheid van 70 km/h. Volgens Tabel 5.16 van de ROA is dit 6% (ROA, 2019). De horizontale afstand van de verbindingsweg tot de uitvoering parallel aan de A15 bedraagt 195 meter. Dit betekent dat de hoogte van de verbindingsweg bij het puntstuk van de uitvoering bij de A15 op een hoogte van $+17,95 - 6 * \frac{195}{100} = +6,25$ meter komt te liggen.

De horizontale afstand tussen het puntstuk van de uitvoering en de tunnelmond van de Thomassentunnel is 130 meter. Dit betekent dat het overige hoogteverschil parallel aan de snelweg kan worden overwonnen, als de snelweg de A15 meestijgt. De tunnelmond ligt op een hoogte van +2,61 meter, waardoor het hoogteverschil $6,25 - 2,61 = 3,64$ meter bedraagt. Dit levert met een horizontale afstand van 130 meter een hellingspercentage van $\frac{3,64}{130} * 100\% = 2,8\%$ op. Volgens Tabel

5.16 van de ROA is het maximale hellingspercentage van de snelweg met een ontwerpsnelheid van 120 km/h 5% (ROA, 2019). Dit betekent dat 2,8% conform de richtlijnen is.

Bij ongelijkvloerse kruising 2 kruist de verbindingsweg Thomassentunnel → N57 de verbindingsweg Calandbrug → A15 West bovenlangs. Aangezien de hoogte van de verbindingsweg Thomassentunnel → N57 op +17,70 meter komt te liggen, vanwege de ongelijkvloerse kruising met het treinspoor, moet de verbindingsweg Calandbrug → A15 West maximaal op een hoogte van $+17,70 - 1,75 - 4,60 = +11,35$ meter komen te liggen. De hoogte van deze verbindingsweg wordt bij ongelijkvloerse kruising 4 nader geanalyseerd.

Figuur 91 geeft een overzicht van de hoogteliggingen bij ongelijkvloerse kruising 2.

3. N57 → Thomassentunnel: ongelijkvloerse kruising met de snelweg de A15 (1)

Om het hoogteverschil tussen de Thomassentunnel en de benodigde hoogte van verbindingsweg Thomassentunnel → N57 bij ongelijkvloerse kruising 2 te realiseren, wordt de A15 na de tunnel met een helling verhoogd tot +6,25 meter bij het puntstuk van de uitvoering van de Thomassentunnel naar de N57. Omdat ongelijkvloerse kruising 5 op 70 meter van het puntstuk van de uitvoering afligt, is het mogelijk om de A15 bij ongelijkvloerse kruising 5 op de oorspronkelijke hoogte van +5,00 meter te leggen. Dit geeft een hellingspercentage van $\frac{6,25-5}{70} * 100\% = 1,8\%$. De verbindingsweg N57 → Thomassentunnel komt daardoor op een hoogte van $+5,00 + 4,60 + 1,75 = 11,35$ meter te liggen.

De verbindingsweg N57 → Thomassentunnel moet bij het eindpunt aansluiten op de zuidelijke tunnelbuis van de Thomassentunnel. Deze tunnelbuis ligt op +3,04 meter hoogte en op een horizontale afstand van 160 meter vanaf ongelijkvloerse kruising 5. Dit levert een hellingspercentage van $\frac{11,35-3,04}{160} * 100\% = 5,2\%$. Het stuk van 80 meter tot aan de invoegstrook van de snelweg wordt op een helling van 5,4% aangelegd, zodat de invoegstrook op een helling van 5% kan worden aangelegd. Dit zorgt ervoor dat wordt voldaan aan de maximaal toegestane hellingspercentages volgens de ROA voor wegen met een ontwerpsnelheid van 70 en 120 km/h.

4. N57 → Thomassentunnel: ongelijkvloerse kruising met de verbindingsweg Calandbrug → A15 West

De verbindingsweg N57 → Thomassentunnel gaat niet over de Havenspoorlijn, maar kruist wel met de verbindingsweg Calandbrug → A15 West. Deze verbindingsweg vanaf de Calandbrug is in de huidige situatie verhoogd aangelegd op ongeveer +10,40 meter volgens het AHN (AHN, z.d.). Dit komt doordat deze verbindingsweg in de huidige situatie over de route van de rotonde naar de Moezelweg heen moet worden gerealiseerd. In de ideale ontwerpvariant is de rotonde bij de Moezelweg weggelaten om tot een zo ideaal mogelijk ontwerp voor de doorstroming en verkeersveiligheid te komen. Dit houdt in dat de verbindingsweg Calandbrug → A15 West bij de ideale ontwerp variant niet verhoogd hoeft worden aangelegd. Daarom wordt de verbindingsweg Calandbrug → A15 West op dezelfde hoogte als de A15 aangelegd (+5,00 meter), waardoor de verbindingsweg N57 → Thomassentunnel bij ongelijkvloerse kruising 4 op een hoogte van $+5,00 + 4,60 + 1,75 = +11,35$ meter komt te liggen.

5. N57 → Thomassentunnel: ongelijkvloerse kruising met de snelweg de A15 (2)

Ongelijkvloerse kruising 3 ligt direct naast ongelijkvloerse kruising 1, waardoor de verbindingsweg N57 → Thomassentunnel de A15 moet kruisen. De A15 ligt volgens het AHN op +5,00 meter boven NAP op de locatie van ongelijkvloerse kruising 3. De benodigde verticale vrije ruimte van 4,60 m en de constructiehoogte van 1,75 van de verhoogde verbindingsweg zorgen ervoor dat de verbindingsweg N57 → Thomassentunnel op een hoogte van $+5,00 + 4,60 + 1,75 = +11,35$ meter komt te liggen.

6. A15 West → Calandbrug: ongelijkvloerse kruising met de N57 net na de Harmsenbrug

De verbindingsweg A15 West → Calandbrug gaat onder de N57 door, die net na de Harmsenbrug kruist met de A15 en deze verbindingsweg. De bovenkant van het wegdek van de N57 ligt nabij de

Harmsenbrug op +13,20 meter, maar loopt richting ongelijkvloerse kruising 1 af tot een hoogte van +11,35 meter. De verbindingsweg A15 West → Calandbrug komt daardoor op een hoogte te liggen van $+11,35 - 1,75 - 4,60 = +5,00$ meter. Dit is gelijk aan de hoogteligging van de A15.

7. A15 West → Calandbrug: ongelijkvloerse kruising met de A15 in de Thomassentunnel

In de huidige situatie gaat de verbindingsweg A15 West → Calandbrug op maaiveldniveau over de tunnelbuizen van de Thomassentunnel heen. In het ideale ontwerp wordt deze ligging behouden, waardoor de verbindingsweg A15 West → Calandbrug bij ongelijkvloerse kruising 7 op een hoogte van +6,10 meter komt te liggen (AHN, z.d.).

8. Havenspoorlijn: ongelijkvloerse kruisingen met de verbindingswegen Calandbrug → A15 West, Calandbrug → N57 en A15 West → Calandbrug

Bij ongelijkvloerse kruising 8 wordt de Havenspoorlijn met een spoorbrug over de verbindingswegen richting de Calandbrug heen gelegd. In het ideale ontwerp wordt hierbij de huidige ligging behouden, waardoor de verbindingswegen Calandbrug → A15 West, Calandbrug → N57 en A15 West → Calandbrug op een hoogte van +5,10 meter worden gelegd (AHN, z.d.). Omdat het spoor van de trein hier op een hoogte van +11,45 meter ligt, wordt voldaan aan de verticale vrije ruimte van de trein.

Hellingspercentages

Door de benodigde hoogtes van de wegvakken op de acht ongelijkvloerse kruisingen en de begin- en eindhoogtes van de wegvakken in acht te nemen, is het mogelijk om de hellingspercentages van de verbindingswegen te bepalen. Het hellingspercentage wordt berekend met de formule: $i = \frac{h}{L} * 100\%$, waarbij i het hellingspercentage is, h het hoogteverschil en L de horizontale lengte van de helling (ROA, 2019).

Tabel 47 geeft een overzicht van de begin- en eindhoogtes van de verbindingswegen, waarbij verbindingswegen met ongelijkvloerse kruisingen tussen de begin- en eindpunten worden opgedeeld in verschillende wegvakken tussen deze kruisingen. Vervolgens wordt aan de hand van de horizontale afstand en het te overbruggen hoogteverschil het benodigde hellingspercentage bepaald.

De hoogtes van de Calandbrug, Harmsenbrug en Thomassentunnel volgen uit technische tekeningen, zoals beschreven in paragraaf 4.2. De hoogte van de A15 (West) wordt afgelezen in het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN, z.d.).

Tabel 47: Ideale ontwerp: overzicht van begin- en eindhoogtes van de (delen van) verbindingswegen en de bijbehorende hoogteverschillen en hellingspercentages

Verbindingsweg	Deel	Beginpunt	Eindpunt	Hoogte beginpunt	Hoogte eindpunt	Hoogteverschil [m]	Horizontale lengte [m]	Bijbehorende hellingspercentage
A15 West → Calandbrug	1	A15 West	Kruising 6	5,9	5	-0,9	950	-0,1%
	2	Kruising 6	Aansluiting Neckarweg	5	7	2	500	0,4%
	3	Aansluiting Neckarweg	Kruising 7	7	6,1	-0,9	200	-0,5%
	4	Kruising 7	Kruising 8	6,1	5,1	-1	35	-2,9%
	5	Kruising 8	Calandbrug	5,1	7,72	2,62	175	1,5%
A15 West → Thomassentunnel	1	A15 West	Kruising 1/5	5,9	5	-0,9	975	-0,1%
	2	Kruising 1/5	Kruising 3	5	5	0	300	0,0%
	3	Kruising 3	Begin invoegstrook	5	6,79	1,79	88	2,0%
	4	Begin invoegstrook	Thomassentunnel	6,79	3,04	-3,75	75	-5,0%

<i>A15 West → N57</i>	1	A15 West	Harmsenbrug	5,9	13,2	7,3	200	3,7%
<i>Calandbrug → A15 West</i>	1	Calandbrug	Kruising 8	7,72	5,1	-2,62	220	-1,2%
	2	Kruising 8	Kruising 2/4	5,1	5	-0,1	400	0,0%
	3	Kruising 2/4	A15 West	5	5,9	0,9	340	0,3%
<i>Calandbrug → N57</i>	1	Kruising 8	Kruising 2	5,1	17,95	12,85	440	2,9%
<i>N57 → Calandbrug</i>	1	Kruising 3	Aansluiting Neckarweg	11,35	7	-4,35	100	-4,4%
<i>N57 → Thomassen-tunnel</i>	1	Harmsenbrug	Kruising 5	13,2	11,35	-1,85	90	-2,1%
	2	Kruising 5	Kruising 4	11,35	11,35	0	105	0,0%
	3	Kruising 4	Kruising 3	11,35	11,35	0	215	0,0%
	4	Kruising 3	Begin invoegstrook	11,35	7,04	-4,31	80	-5,4%
	5	Begin invoegstrook	Thomassen-tunnel	7,04	3,04	-4	80	-5,0%
<i>N57 → A15 West</i>	1	Harmsenbrug	Kruising 1	13,2	11,35	-1,85	100	-1,9%
	2	Kruising 1	A15 West	11,35	5,9	-5,45	220	-2,5%
<i>Thomassen-tunnel → A15 West</i>	1	Thomassen-tunnel	Einde uitvoegstrook	2,61	6,25	3,64	140	2,6%
	2	Einde uitvoegstrook	Kruising 3	6,25	5	-1,25	70	-1,8%
	3	Kruising 3	Kruising 1/5	5	5	0	265	0,0%
	4	Kruising 1/5	A15 West	5	5,9	0,9	630	0,1%
<i>Thomassen-tunnel → N57</i>	1	Thomassen-tunnel	Einde uitvoegstrook	2,61	6,25	3,64	130	2,8%
	2	Einde uitvoegstrook	Kruising 2	6,25	17,95	11,7	195	6,0%
	3	Kruising 2	Kruising 1	17,95	17,7	-0,25	100	-0,3%
	4	Kruising 1	Harmsenbrug	17,7	13,2	-4,5	100	-4,5%

Om het hoogteverschil tussen de A15 West en de N57 te overbruggen op de verbindingsweg A15 West → N57, wordt het puntstuk van de uitvoegstrook van deze verbindingsweg 200 meter ten westen van de Harmsenbrug geplaatst. Hierdoor loopt de verbindingsweg 200 meter parallel aan de A15 en kan de helling hier worden toegepast, zodat de bocht met een boogstraal van 85 meter met 0% helling kan worden gerealiseerd. Ook bij de verbindingsweg N57 → A15 West wordt de helling pas na de boogstraal van 85 meter toegepast, zodat de boog kan worden gerealiseerd met 0% helling.

Verificatie van de wegvaklengtes met maximale hellingspercentages

Tabel 5.16 van de ROA geeft per ontwerpsnelheid het maximale hellingspercentage en de maximale lengte waarover deze helling mag worden toegepast. De maximale lengte van de helling voorkomt dat de snelheidsterugval van vrachtverkeer te groot wordt. De volgende richtwaarden zijn gegeven (ROA, 2019):

- 90 & 120 km/h: 5% helling 500 meter lang
- 70 km/h: 6% helling 350 meter lang
- 50 km/h: 7% helling 250 meter lang

Wanneer in Tabel 47 gekeken wordt naar de wegvakken met 5 en 6% helling blijkt dat alle lengtes kleiner zijn dan de maximale lengtes volgens de richtwaarden. Daarnaast is geen enkele helling groter dan de toegestane hellingspercentages van 5 en 6%. Dit betekent dat het verticale alignment van de ideale ontwerpvariant voldoet aan de richtlijnen.

Bijlage 16: Berekening van de lengtes van de in- en uitvoegstroken van het ideale ontwerp

Nu de hellingen van de wegvakken van de ideale ontwerpvariant van de Harmsenknoop bekend zijn, is het mogelijk om de benodigde lengte van de in- en uitvoegstroken te bepalen. Deze lengtes worden bepaald aan de hand van de acceleratie- of deceleratielengte.

Invoegstroken - acceleratielengtes

Volgens paragraaf 6.4 zijn de discontinuïteiten 2-i, 3-i, 4-1 en 5-i invoegingen. De acceleratielengte is de afstand die voertuigen nodig hebben om op een comfortabele manier tot de gewenste snelheid te komen (ROA, 2019). De acceleratielengte begint bij het begin van de overgangsboog van de toeleidende rijbaan en wordt berekend met de volgende formule:

$$\text{Acceleratielengte: } L_a = \frac{(0,75 * v_0)^2 - v_b^2}{256 * (\frac{a}{g} - \frac{p}{100})} \quad (15)$$

Waarbij:

- v_0 = ontwerpsnelheid van de doorgaande rijbaan [km/h]
- v_b = ontwerpsnelheid aan het begin van de acceleratielengte [km/h]
- a = acceleratie van het voertuig [1,0 m/s²]
- g = zwaartekrachtversnelling [9,8 m/s²]
- p = gemiddelde hellingspercentage van de weg [%], positief bij stijging.

Bij invoeging 2-i hebben de toeleidende en doorgaande rijbanen beide een ontwerpsnelheid van 70 km/h. Dit betekent dat het verkeer niet extra hoeft te accelereren om op dezelfde snelheid te komen. De lengte van invoegstrook 2-i wordt vanwege de beperkte ruimte 150 meter lang gemaakt.

Bij invoeging 3-i ligt de invoegstrook op 400 meter na de overgangsboog van de verbindingsweg N57 → A15 West, waardoor het verkeer op de toeleidende rijbaan de benodigde snelheid bereikt. De lengte van de invoegstrook wordt 200 meter lang gemaakt, zodat het verkeer voldoende ruimte heeft om in te voegen op de snelweg.

De invoegstrook van de verbindingsweg A15 West → N57 (discontinuïteit 4-i) komt onder dezelfde helling als de verbindingsweg Thomassentunnel → N57 tussen ongelijkvloerse kruising 1 en de Harmsenbrug. Het bijbehorende hellingspercentage is -4,5%. Dit zorgt voor een zeer korte benodigde acceleratielengte van 6,80 meter voor het verkeer van de A15 West naar de N57. De invoegstrook loopt tot vlak voor de Harmsenbrug, waardoor de lengte van deze invoegstrook 60 meter wordt. De keuze om de snelweg de A15 meer naar het noorden te leggen dan in het huidige ontwerp, maakt het mogelijk dat de invoegstrook van de A15 West naar de N57 voor de Harmsenbrug kan worden gerealiseerd.

Bij invoeging 5-i rijdt het verkeer op de toeleidende rijbaan 80 km/h, terwijl het verkeer op de doorgaande rijbaan hier accelereert van 50 naar 120 km/h. Dit betekent dat geen extra acceleratielengte nodig is en daarom wordt de lengte van deze invoegstrook 150 meter lang gemaakt.

Uitvoegstroken – deceleratielengtes

Volgens paragraaf 6.4 zijn de discontinuïteiten 2-u, 3-u, 4-u uitvoegingen. De deceleratielengte is de afstand die voertuigen nodig hebben om de snelheid te verminderen zodat het stroomafwaarts gelegen wegvak veilig bereden kan worden (ROA, 2019). De deceleratielengte op de uitvoegstrook en afleidende rijbaan moet voldoende groot zijn, zodat op de hoofdbaan niet afgeremd hoeft te worden.

De deceleratielengte dient voor twee scenario's geanalyseerd te worden:

- Deceleratie begint aan het begin van de uitvoegstrook en gaat door tot aan het midden van de overgangsboog, zodat een comfortabele deceleratie wordt gecreëerd ($d = 1,5 \text{ m/s}^2$). Bijbehorende deceleratielengte is L_d .
- Deceleratie begint bij het puntstuk van de uitvoeging en gaat door tot het midden van de overgangsboog, waardoor een forse deceleratie noodzakelijk is ($d = 2,5 \text{ m/s}^2$). Bijbehorende deceleratielengte is L_d' .

De deceleratielengte wordt berekend met de volgende formule (ROA, 2019):

$$\text{Deceleratielengte: } L_d = \frac{v_0^2 - v_a^2}{256 * (\frac{d}{g} + \frac{p}{100})} \quad (16)$$

Waarbij:

- v_0 = ontwerpsnelheid van de doorgaande rijbaan [km/h]
- v_a = ontwerpsnelheid van de afbuigende rijbaan [km/h]
- d = vertraging van het voertuig (comfortabel: $1,5 \text{ m/s}^2$ en hard: $2,5 \text{ m/s}^2$)
- g = zwaartekrachtversnelling [$9,8 \text{ m/s}^2$]
- p = gemiddelde hellingspercentage van de weg [%], positief bij stijging.

Bij uitvoegingen 2-u en 4-u hebben de afbuigende rijbanen een lengte van respectievelijk 900 en 200 meter, waardoor voldoende lengte voor deceleratie aanwezig is. De uitvoegstroken worden 200 meter lang gemaakt, zodat het verkeer voldoende ruimte heeft om uit te voegen. 2-u vormt daarmee een weefvlak met de invoeging stroomopwaarts op de A15.

Bij uitvoeging 3-u verandert de snelheid tussen de doorgaande en afbuigende rijbaan niet, omdat beide 70 km/h zijn. Vanwege de beperkte ruimte in deze S-boog, wordt de lengte van de uitvoegstrook 150 meter lang.

Splitsing 1-u bevat ook een taperuitvoeging, de dimensionering van deze taperuitvoeging is gelijk aan die in het huidige ontwerp van de Harmsenknoop. Splitsing 5-u bevat een extra rijstrook aan de rechterkant. Deze extra rijstrook begint direct na de Harmsenbrug, zodat het verkeer tijdig van rijstrook kan wisselen.

Bijlage 17: Turbulentielengtes in ideaal ontwerp

In deze bijlage wordt gecontroleerd of de gehanteerde turbulentielengtes in het ideaal ontwerp voldoen aan de minimale turbulentielengtes volgens Tabel 6.6 van de Richtlijnen Ontwerp Autosnelwegen (ROA). Daarnaast is gekeken naar de gewenste afstand tussen een discontinuïteit en een tunnelingang volgens Tabel 9.6 van de ROA. Tabel 48 geeft een overzicht van de minimaal benodigde en de gehanteerde turbulentieafstanden in het ideale ontwerp.

Tabel 48: Overzicht minimaal benodigde turbulentieafstanden en gehanteerde afstanden in het ideaal ontwerp (ROA, 2019)

Verkeersstroom	Afstand tussen	Afstand in ideaal ontwerp [m]	Minimale turbulentieafstand [m]	Voldoet het ideaal ontwerp?
A15 West → Calandbrug	2-u en 6-i	1435	150	Ja
A15 West → Thomassentunnel	2-u en 4-u	1060	525	Ja
	4-u en 1-i	725	150	Ja
	1-i en tunnel	10	205	Nee
A15 West → N57	4-u en 4-i	310	150	Ja
Calandbrug → A15 West	6-u en 5-i	1070	150	Ja
	5-i en 3-i	310	450	Nee
Calandbrug → N57	6-u en 2-i	550	150	Ja
N57 → Calandbrug	3-u en 6-i	190	150	Ja
N57 → Thomassentunnel	5-u en 3-u	295	525	Nee
	3-u en 1-i	170	150	Ja
N57 → A15 West	5-u en 5-1	335	150	Ja
Thomassentunnel → A15 West	Tunnel en 1-u	160	345	Nee
	1-u en 3-i	590	150	Ja
Thomassentunnel → N57	1-u en 2-i	175	150	Ja
	2-i en 4-i	300	450	Nee

Bijlage 18: Uitwerking dwarsprofiel van ideale ontwerp

In deze bijlage wordt het dwarsprofiel van het ideale ontwerp uitgewerkt. Bij de knelpuntenanalyse (Hoofdstuk 8) is namelijk een eerste inzicht in de benodigde ruimte voor het dwarsprofiel van de wegen van de Harmsenknoop noodzakelijk.

Voor het bepalen van de benodigde onderdelen en bijbehorende afmetingen van de dwarsprofielen worden de Richtlijnen Ontwerp Autosnelwegen (ROA) gebruikt. De reden hiervoor is dat alle wegvakken op de Harmsenknoop vallen onder de wegcategorie autosnelwegen of regionale stroomwegen, die als verbindingswegen worden gebruikt. Dit betekent dat alle wegvakken moeten voldoen aan de minimale afmetingen volgens de ROA.

Hoewel de wegvakken van de Harmsenknoop verschillen in het aantal rijstroken en de ontwerpsnelheid, geeft Tabel 49 een overzicht van de verplichte en optionele onderdelen van het dwarsprofiel van elk wegvak.

Tabel 49: Overzicht onderdelen van dwarsprofielen (ROA, 2019)

Onderdeel	Verplicht/optoneel	Locatie	Afmeting	Bron
Rijstrook	Verplicht	Hoofdrijbaan	3,50 m	ROA p.83
		Verbindingsweg	3,30 m	ROA p.83
Vluchtstrook	Verplicht	Rechterzijde van rijbaan	3,50 m	ROA p.85
Kantstreep	Verplicht	Aan buitenzijde van rijstrook	0,20 m	ROA p.85
Redresseerstrook	Verplicht	Linkerzijde van rijbaan	0,60 m	ROA p.86
In- of uitvoegstrook	Optioneel	Rechterzijde van rijstrook	3,30 m	ROA p.83

Voertuigkering en middenberm

Naast de onderdelen uit Tabel 49 is het bij tegengestelde rijbanen met een ontwerpsnelheid van 100 km/h of hoger verplicht om een afschermingsvoorziening of voertuigkering te plaatsen om te voorkomen dat het verkeer van de tegengestelde rijbanen in conflict kunnen komen (ROA, 2019). Dit kan enkel een voertuigkering zijn tussen beide rijbanen of een middenberm waarin de voertuigkering is opgenomen. De middenberm is de ruimte tussen de buitenkant van de kantstreep van de ene rijbaan en de buitenkant van de kantstreep van de tegengestelde rijbaan. De middenberm is symmetrisch met in het midden een stuk gras. De middenberm bevat daarnaast een obstakelvrije zone van 2,5 m (inclusief de redresseerstrook van 0,6 m) en de voertuigkeringen. De breedte van het stuk gras en de voertuigkeringen zijn variabel, maar in Hoofdstuk 14 van het Handboek wegontwerp buiten de bebouwde kom van CROW, wordt een voertuigkering van 0,8 m aangehouden (CROW - Wegontwerp BBK, 2025). Vanwege de beperkte ruimte bij de Harmsenknoop is gekozen om de breedte van het gras in de middenberm smal te houden. Als het gras 1,4 meter breed wordt, wordt de totale breedte van de middenberm: $2,5 * 2 + 0,8 * 2 + 1,4 = 8,0$ meter.

Bochtverbreding

Bij de dwarsprofielen van de verbindingswegen is het noodzakelijk dat bij boogstralen kleiner dan 300 meter gecontroleerd wordt of bochtverbreding nodig is. Bochtverbreding wordt toegepast om het verschil tussen de boogstraal die de voor- en achterwielen van een voertuig doorlopen in een bocht op te vangen (ROA, 2019). De benodigde bochtverbreding wordt berekend met de volgende formule (ROA, 2019):

$$\text{Bochtverbreding} = (R_{\text{buiten}} - R_{\text{binnen}}) - B_{\text{voertuig}} - (B_{\text{rijstrook}} - B_{\text{rijtaak}}) \quad (17)$$

Waarbij:

- **R_{buiten}** = Boogstraal buitenbocht bij het verst naar buiten gelegen punt van het voertuig [m]
- **R_{binnen}** = Boogstraal binnenbocht bij het verst naar binnen gelegen punt van het voertuig [m]

- **Bvoertuig** = breedte van het maatgevende voertuig [2,55 m]
- **Brijstrook** = breedte van de rijstrook [m]
- **Brijtaak** = breedte voor het uitvoeren van de rijtaak [m]

De benodigde breedte voor het uitvoeren van de rijtaak is afhankelijk van de ontwerpsnelheid en volgt uit Tabel 5.21 van de ROA. De volgende breedtes worden gebruikt (ROA, 2019):

- 70, 90 en 120 km/h: 3,05 m
- 50 km/h: 2,80 m

Bochtverbreeding wordt geleidelijk toegepast in de overgangsboog. Het wordt aangeraden om in vervolgonderzoek te analyseren of de berekende lengtes van de overgangsbogen toereikend zijn voor het inpassen van bochtverbreeding.

Overzicht totale breedte van dwarsprofielen

In Tabel 50 zijn voor elke verkeersstroom een overzicht van de afmetingen van de onderdelen van het dwarsprofiel weergegeven en wordt de totale breedte van het dwarsprofiel berekend. Daarnaast is voor elke verkeersstroom met een boogstraal kleiner dan 300 meter gekeken of bochtverbreeding noodzakelijk is. De resultaten van de benodigde bochtverbreeding per verkeersstroom zijn opgenomen in Tabel 50.

Tabel 50: Ideale ontwerp: overzicht afmetingen van de onderdelen van het dwarsprofiel per verkeersstroom (ROA, 2019)

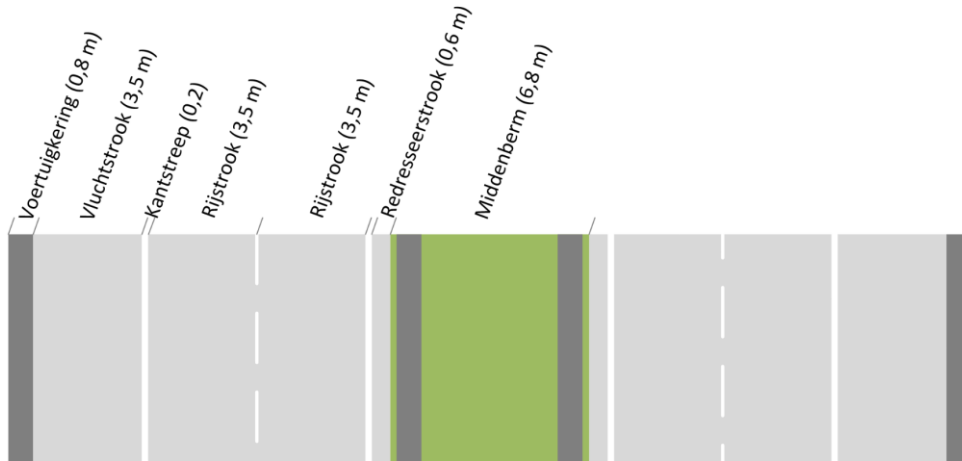
Verkeersstroom	Aantal rijstroken	Rijstrook-breedte	Vluchtstrook	Kantstreep (2x toepassen)	Redresseerstrook	Bochtverbreeding	Totale breedte
A15 West → Calandbrug (A15 West → 6-i)	1	3,30 m	3,50 m	0,20 m	0,60 m	0,00 m	7,80 m
A15 West → Calandbrug (6-i → Calandbrug)	2	3,30 m	3,50 m	0,20 m	0,60 m	0,00 m	11,10 m
A15 West → Thomassentunnel	2	3,50 m	3,50 m	0,20 m	0,60 m	0,00 m	11,50 m
A15 West → N57	1	3,30 m	3,50 m	0,20 m	0,60 m	0,40 m	8,20 m
Calandbrug → A15 West	1	3,30 m	3,50 m	0,20 m	0,60 m	0,00 m	7,80 m
Calandbrug → N57	1	3,30 m	3,50 m	0,20 m	0,60 m	0,00 m	7,80 m
N57 → Calandbrug	1	3,30 m	3,50 m	0,20 m	0,60 m	0,20 m	8,00 m
N57 → Thomassentunnel	2	3,30 m	3,50 m	0,20 m	0,60 m	0,20 m	11,30 m
N57 → A15 West	1	3,30 m	3,50 m	0,20 m	0,60 m	0,40 m	8,20 m
Thomassentunnel → A15 West	2	3,50 m	3,50 m	0,20 m	0,60 m	0,00 m	11,50 m
Thomassentunnel → N57	2	3,30 m	3,50 m	0,20 m	0,60 m	0,20 m	11,30 m

De verkeersstroom A15 West → Calandbrug is in twee delen opgesplitst, omdat het eerste stuk van de A15 West tot aan discontinuïteit 6-i uit één rijstrook bestaat en het tweede stuk van 6-i tot de Calandbrug uit twee rijstroken bestaat.

Hoewel de verkeersstromen op de Harmsenknoop voor elke rijrichting apart zijn bekeken en daarmee een eigen dwarsprofiel hebben, lopen de verkeersstromen A15 West ↔ Thomassentunnel parallel aan elkaar, waardoor zij samen één dwarsprofiel vormen. Daarnaast moet het dwarsprofiel van de wegen vlak voor de Harmsenbrug nader worden bekeken.

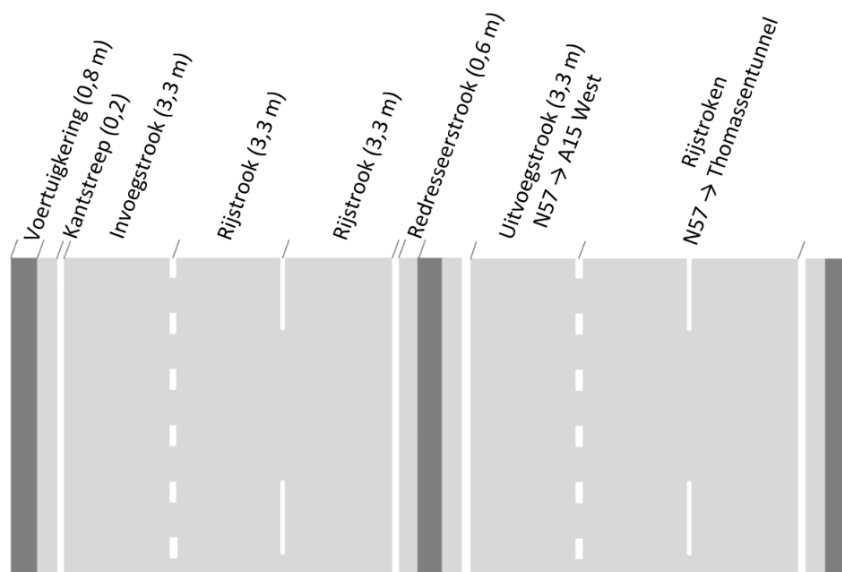
De verkeersstromen A15 West ↔ Thomassentunnel zijn tegengestelde rijrichtingen van de A15, waardoor een voertuigkering noodzakelijk is. Deze voertuigkering is 0,8 meter breed en wordt aan beide zijden van de rijbanen toepast. Hierbij worden de twee middelste keringen geplaatst in een middenberm, zodat tussen de rijbanen ruimte overblijft voor constructies voor lichtvoorziening en

bebording. De middenberm is 8,0 meter breed en is inclusief de redresseerstroken van beide rijbanen. De totale breedte van de A15 is daardoor opgebouwd uit de breedte van beide rijbanen (min de redresseerstroken), de twee buitenste voertuigkeringen en de middenberm. Dit levert een totale breedte van 31,4 meter op voor het dwarsprofiel van de A15. Het dwarsprofiel van de A15 is schematisch weergegeven in Figuur 92.



Figuur 92: Schematische weergave dwarsprofiel van de A15 met een totale breedte van 31,4 meter

Het huidige dwarsprofiel op de Harmsenbrug blijft behouden om te voorkomen dat de constructie van de brug moet worden veranderd. Om te voldoen aan het benodigde aantal rijstroken voor het ideale ontwerp, wordt het dwarsprofiel vlak voor de Harmsenbrug aangepast. Het ideale ontwerp heeft hier namelijk een invoegstrook voor de route A15 West → N57, twee rijstroken voor de route Thomassentunnel → N57, één rijstrook voor de route N57 → A15 West en twee rijstroken voor de route N57 → Thomassentunnel. Daarnaast moet een voertuigkering tussen beide rijrichtingen worden geplaatst om conflicten tussen de tegengestelde verkeersstromen te voorkomen. Doordat de route N57 → A15 West één rijstrook heeft en de route N57 → Thomassentunnel twee rijstroken heeft, zit de blokmarkering tussen de linker en middelste rijbaan. Dit resulteert in een 1+2 splitsing, zoals beschreven in paragraaf 6.4. Het dwarsprofiel van de N57 net voor de Harmsenbrug is weergegeven in Figuur 93. De totale breedte bedraagt 25,4 meter.



Figuur 93: Schematische weergave dwarsprofiel N57 vlak na de Harmsenbrug (noordzijde) met een totale breedte van 25,4 meter

Bijlage 19: Uitwerking van het realistische ontwerp

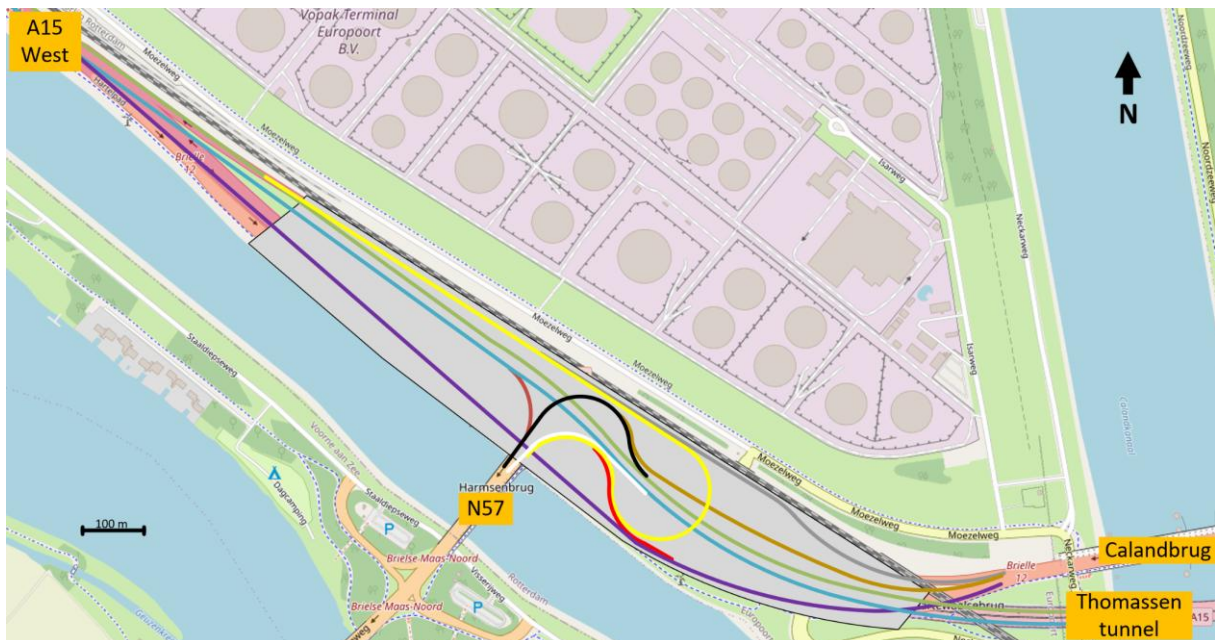
In deze bijlage wordt in detail beschreven hoe de ontwerpconcessies aan het ideale ontwerp worden uitgewerkt om tot de realistische ontwerpvariant te komen. Hierbij wordt gekeken naar het horizontaal en verticaal alignment, de lengtes van in- en uitvoegstroken en het dwarsprofiel.

Horizontaal alignment

Ten opzichte van het horizontale alignment van de ideale ontwerpvariant wordt de boogstraal van de verbindingswegen N57 ↔ Thomassentunnel aangepast naar 80 meter. Dit heeft als gevolg dat ook de boogstralen van de verbindingswegen N57 ↔ Calandbrug moeten worden aangepast, omdat deze halverwege de boog tussen de N57 en Thomassentunnel worden aangesloten. De verbindingsweg N57 → Calandbrug wordt zodoende veranderd in een S-boog met een boogstraal van 80 meter. De verbindingsweg Calandbrug → N57 heeft na de Calandbrug eerst een boogstraal van 400 meter, voordat het na een rechtstand van 320 meter overgaat in de S-boog van de verbindingsweg Thomassentunnel → N57 met een boogstraal van 80 meter.

De tweede ontwerpconcessie die in de realistische ontwerpvariant wordt doorgevoerd is het verleggen van de verbindingsweg N57 → A15 West, waardoor deze eerst richting het oosten afbuigt, voordat met een boogstraal van 80 meter 180 graden gedraaid wordt in de richting van de A15 West. Om deze bocht van 180 graden mogelijk te maken met een boogstraal van 80 meter, moet de verbindingsweg A15 West → Calandbrug een paar meter naar het Hartelkanaal worden opgeschoven. Dit is mogelijk met een rechtstand en vervolgens een boogstraal van 675 meter tot aan de Calandbrug.

Deze veranderingen aan het ideale ontwerp zorgen voor een realistische ontwerpvariant. De viltstiftenschets van de realistische ontwerpvariant is weergegeven in Figuur 94. Tabel 51 geeft een overzicht van de ontwerpparameters en gekozen boogstralen van de verbindingswegen in het realistische ontwerp.



Figuur 94: Viltstiftenschets realistische ontwerpvariant met verschillende kleuren voor de tien verkeersstromen

Tabel 51: Realistische ontwerp: overzicht van de ontwerpparameters en de gekozen boogstraal (ROA, 2019)

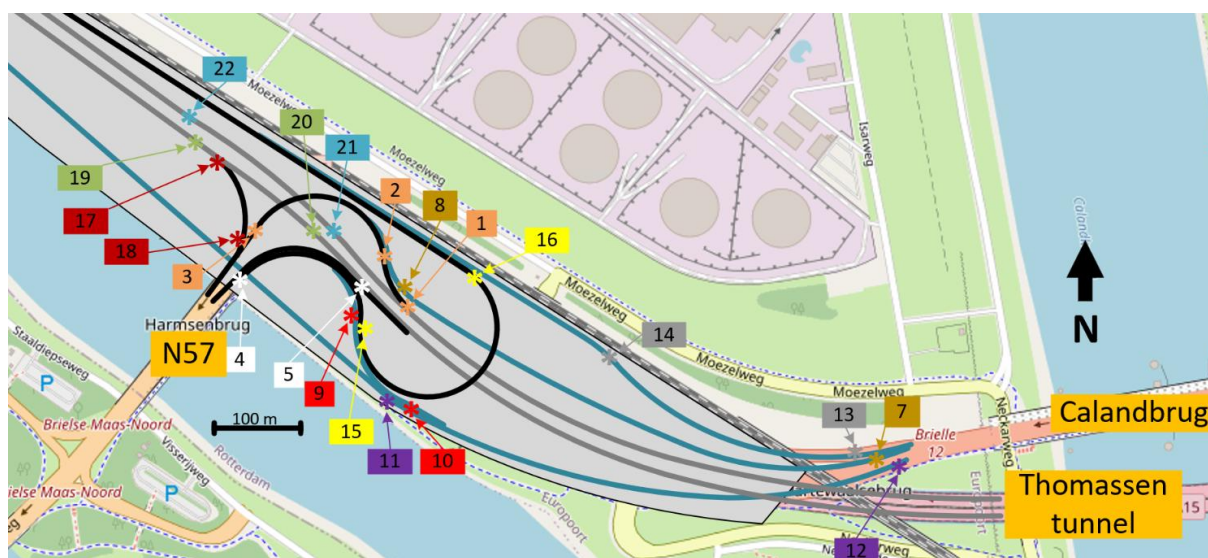
Verkeersstroom	Kleur	Ontwerpsnelheid	Verkanting	Boogstraal
A15 West → Calandbrug	Paars	90 km/h	2,5 %	675 m
A15 West → Thomassentunnel	Lichtblauw	120 km/h	5%	750 m
A15 West → N57	Roodbruin	50 km/h	6,5%	80 m
Calandbrug → A15 West	Grijs	90 km/h	6%	330 m
Calandbrug → N57	Goud	50 km/h	2,5%	400 m
N57 → Calandbrug	Rood	50 km/h	6,5%	80 m
N57 → Thomassentunnel	Wit	50 km/h	6,5%	80 m
N57 → A15 West	Geel	50 km/h	6,5%	80 m
Thomassentunnel → A15 West	Lichtgroen	120 km/h	5%	750 m
Thomassentunnel → N57	Zwart	50 km/h	6,5%	80 m

Overgangsbogen

Doordat een aantal boogstralen zijn gewijzigd ten opzichte van de ideale ontwerpvariant, zullen voor deze bogen in de realistische ontwerpvariant nieuwe lengtes van de overgangsbogen moeten worden berekend. Dit gebeurt op dezelfde wijze als bij het horizontale alignement van de ideale ontwerpvariant, zoals beschreven in paragraaf 7.1 en Bijlage 14.

De overgangsbogen op de Harmsenknoop zijn gelabeld en de ligging van de overgangsbogen in de realistische ontwerpvariant is weergegeven in Figuur 95. Tabel 52 geeft een overzicht van de berekening van de totale lengte van de overgangsbogen op de Harmsenknoop. Hierbij zijn de overgangsbogen tussen twee tegengestelde bogen opgesplitst in overgangsbog a en b en is de totale lengte van de overgangsbog tussen de tegengestelde bogen de som van overgangsbogen a en b.

Ten opzichte van de ideale ontwerpvariant zijn de overgangsbogen 1 - 5, 8 - 11, 15 en 16 gewijzigd voor het horizontale alignement van de realistische ontwerpvariant. Daarnaast is overgangsbog 6 van de ideale variant niet nodig in de realistische variant, omdat de verbindingsweg N57 → Thomassentunnel nu geen S-boog bevat, maar door de kleinere boogstraal met een directe boog op de A15 kan worden aangesloten.



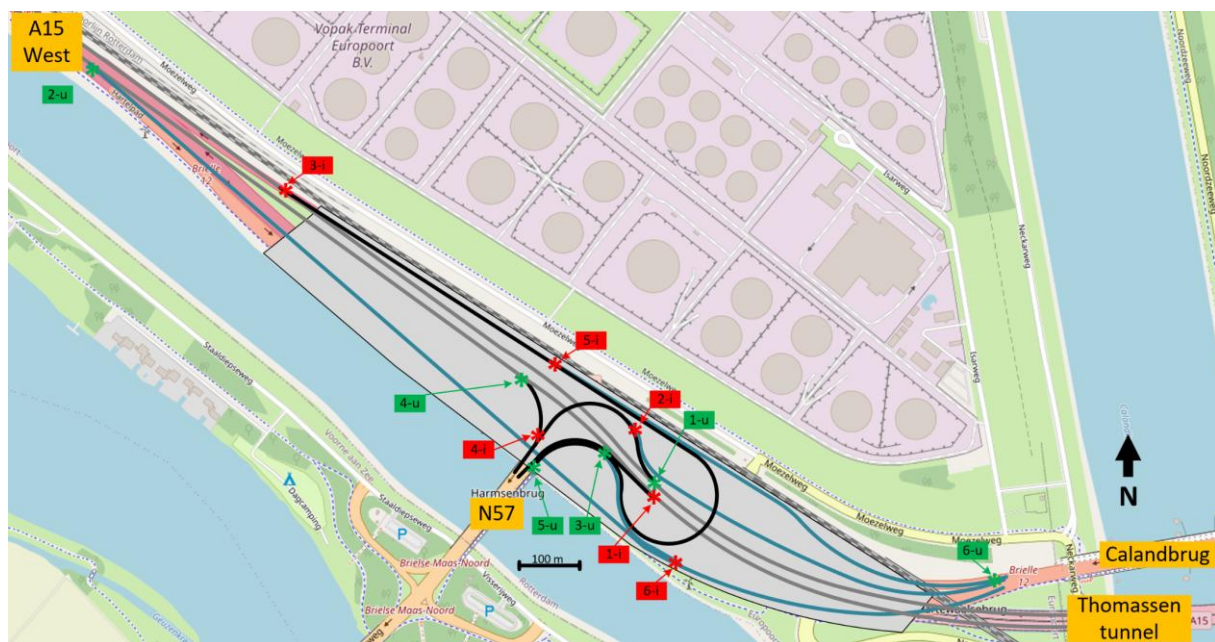
Figuur 95: Overzicht ligging overgangsbogen realistisch ontwerp

Tabel 52: Realistische ontwerp: overzicht van de eigenschappen en berekening van de overgangsbogen op de Harmsenknoop

Overgangsboog	Snelheidsafname t.o.v. vorige wegvak?	Boogstraal (R)	$\frac{1}{3} * R$	Comfort-eis	Gekozen waarde voor A	Lengte overgangs-boog (L)	Totale lengte overgangs-boog
1, 4, 8, 17	Ja	80	26,67	-	26,67	8,89	8,89
2a, 9a, 15a	Nee	80	26,67	60	60,00	45,00	90,00
2b, 9b, 15b	Nee	80	26,67	60	60,00	45,00	
3, 5, 10, 16, 18	Nee	80	26,67	60	60,00	45,00	45,00
7	Ja	400	133,33	-	133,33	44,44	44,44
11, 12	Nee	675	225,00	175	225,00	75,00	75,00
13, 14	Nee	330	110,00	175	175,00	92,80	92,80
19, 22	Nee	750	250,00	270	270,00	97,20	97,20
20a, 21a	Nee	750	250,00	270	270,00	97,20	194,40
20b, 21b	Nee	750	250,00	270	270,00	97,20	

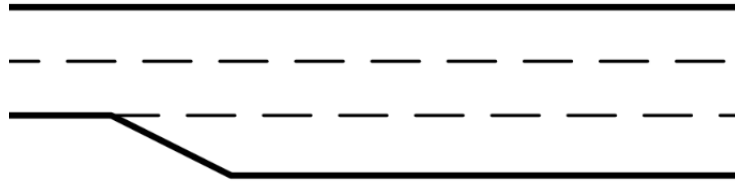
Ligging van discontinuïteiten

Ten opzichte van het ideale ontwerp zijn bij de realistische ontwerpvariant de discontinuïteiten 3-u en 5-u gewijzigd door het verleggen van de verbindingsweg N57 → A15 West. Daarnaast is discontinuïteit 5-i richting het oosten verlegd in de realistische variant om beter aan te sluiten op de verlegde verbindingsweg N57 → A15 West. De locatie van alle discontinuïteiten en bijbehorende labels in de realistische ontwerpvariant zijn weergegeven in Figuur 96.

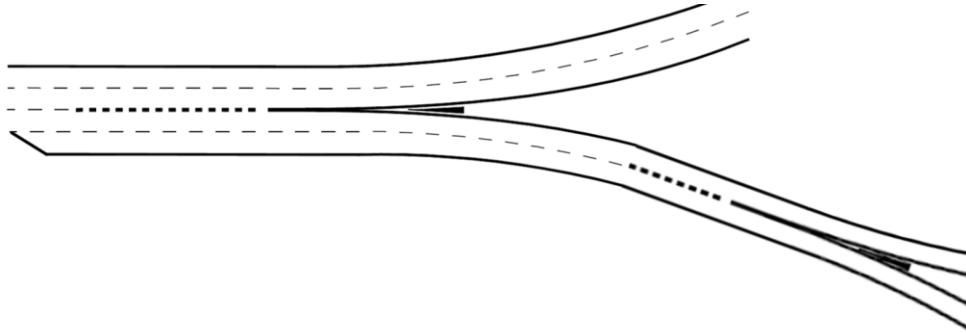


Figuur 96: Ligging van de discontinuïteiten van de realistische ontwerpvariant

Discontinuïteit 5-u wordt in de realistische variant een toevoeging van een extra rijstrook aan de rechterkant, zodat het wegvak richting discontinuïteit 3-u drie rijstroken bevat. Figuur 97 geeft een principeschets van discontinuïteit 5-u weer. Discontinuïteit 3-u moet in de realistische variant worden aangepast, zodat alle drie de verbindingswegen N57 → Thomassentunnel, N57 → A15 West en N57 → Calandbrug na discontinuïteit 3-u als gescheiden verbindingswegen verdergaan. Dit betekent dat discontinuïteit 3-u bestaat uit een 2+2 splitsing en een 1+1 splitsing. Figuur 98 geeft een principeschets van discontinuïteit 3-u weer. De overige discontinuïteiten in het realistische ontwerp blijven gelijk aan die van het ideale ontwerp en deze worden weergegeven in Bijlage 11.



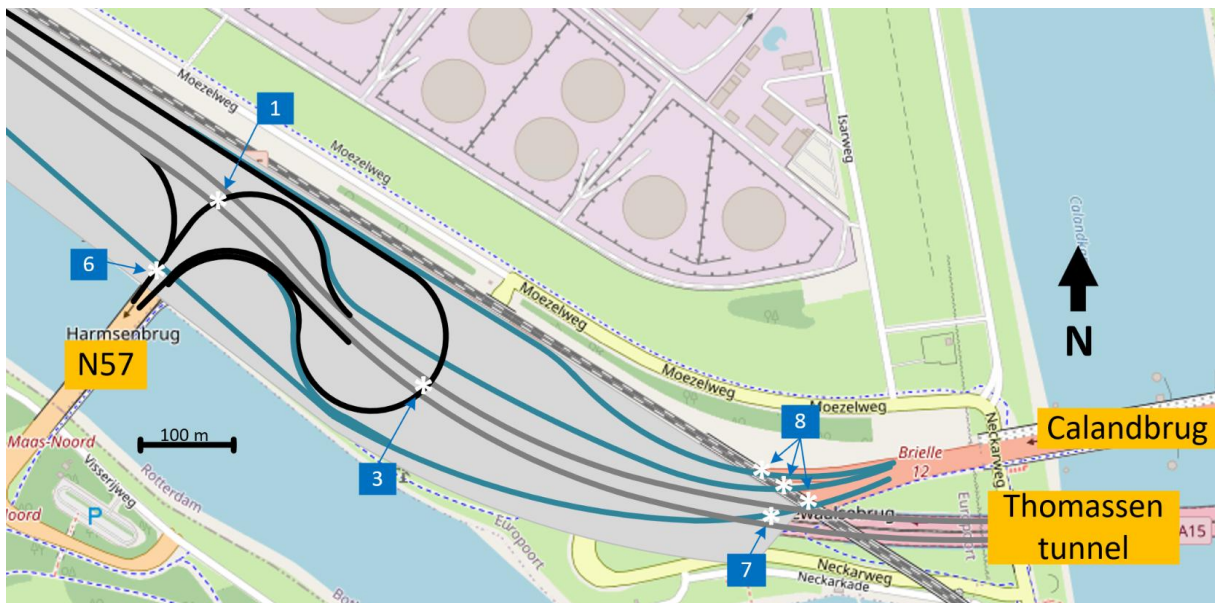
Figuur 97: Principeschets discontinuïteit 5-u van de realistische ontwerpvariant



Figuur 98: Principeschets discontinuïteit 3-u van de realistische ontwerpvariant

Verticaal alignement

Het verticaal alignement van de ideale ontwerpvariant is de basis voor het verticale alignement van de realistische ontwerpvariant. Vanwege de verlegging van de verbindingsweg N57 → A15 West en het verkleinen van de boogstralen van de verbindingswegen N57 ↔ Thomassentunnel zijn de ongelijkvloerse kruisingen 2, 4, en 5 van het ideale ontwerp opgeheven. Daarnaast kruisen enkel de A15 en de verbindingsweg Thomassentunnel → N57 elkaar bij ongelijkvloerse kruising. Verder wordt ongelijkvloerse kruising 3 verlegd en is dit een ongelijkvloerse kruising tussen de A15 en de verbindingsweg N57 → A15 West in plaats van tussen de A15 en de verbindingsweg N57 → Thomassentunnel/Calandbrug. Ongelijkvloerse kruisingen 6, 7, en 8 blijven gelijk aan die in het ideale ontwerp. Figuur 99 geeft een overzicht van de ongelijkvloerse kruisingen in de realistische ontwerpvariant. De ongelijkvloerse kruisingen die in het realistische ontwerp worden aangepast worden hieronder nader besproken.



Figuur 99: Overzicht ligging van de ongelijkvloerse kruisingen van het realistische ontwerp

Ongelijkvloerse kruising 1: Thomassentunnel → N57 en de snelweg de A15

Bij ongelijkvloerse kruising 1 hoeft de verbindingsweg Thomassentunnel → N57 enkel de snelweg de A15 te kruisen. Volgens het Algemeen Hoogtebestand Nederland ligt de snelweg hier op +5,00 meter (AHN, z.d.). Door gebruik te maken van het minimale verticale profiel van vrije ruimte van 4,60 meter voor voertuigen en een aangenomen constructiehoogte van 1,75 meter (paragraaf 7.2), moet de verbindingsweg Thomassentunnel → N57 bij ongelijkvloerse kruising 1 op $5,00 + 4,60 + 1,75 = +11,35$ meter hoogte komen te liggen.

Ongelijkvloerse kruising 3: N57 → A15 West en de snelweg de A15

In de realistische ontwerpvariant is ongelijkvloerse kruising 3 meer naar het westen verlegd, vanwege de verlegging van de verbindingsweg N57 → A15 West. Volgens het Algemeen Hoogtebestand Nederland ligt de snelweg op de nieuwe locatie van ongelijkvloerse kruising 3 op +4,80 meter hoogte (AHN, z.d.). Dit betekent dat de verbindingsweg N57 → A15 West bij ongelijkvloerse kruising 3 op $4,80 + 4,60 + 1,75 = 11,15$ meter komt te liggen. Daarnaast moet ook de verbindingsweg Calandbrug → N57 bij ongelijkvloerse kruising 3 op een hoogte van +4,80 meter komen te liggen.

Hoogteligging discontinuïteit 3-u

Vanaf de Harmsenbrug tot discontinuïteit 3-u liggen de verbindingswegen N57 → Thomassentunnel, N57 → A15 West en N57 → Calandbrug op dezelfde rijbaan. Dit betekent dat de hoogteligging van discontinuïteit 3-u voor alle drie de verbindingswegen gelijk moet zijn, omdat het verkeer anders niet van rijstrook kan wisselen om naar de juiste verbindingsweg te gaan. De verbindingswegen N57 → Thomassentunnel en N57 → Calandbrug hebben allebei een daling vanaf de Harmsenbrug nodig. Verbindingsweg N57 → A15 West moet de A15 bij ongelijkvloerse kruising 3 bovenlangs kruisen op een hoogte van +11,15 meter. Dit betekent dat discontinuïteit maximaal tot deze hoogte kan dalen, waardoor discontinuïteit 3-u op een hoogte van +11,15 meter komt te liggen.

Hellingspercentages

Nu de hoogtes van de begin- en eindpunten van de verbindingswegen en bij de ongelijkvloerse kruisingen bekend zijn, is het mogelijk om de bijbehorende hellingspercentages van de wegvakken op de Harmsenknoop te bepalen. Dit gebeurt op dezelfde manier als in paragraaf 7.2 en Tabel 53 geeft een overzicht van de hoogteverschillen en bijbehorende hellingspercentages van de verschillende delen van de verbindingswegen in de realistische ontwerpvariant.

Tabel 53: Realistische ontwerp: overzicht van begin- en eindhoogtes van de (delen van) verbindingswegen en de bijbehorende hoogteverschillen en hellingspercentages

Verbindingsweg	Deel	Beginpunt	Eindpunt	Hoogte beginpunt	Hoogte eindpunt	Hoogteverschil [m]	Horizontale lengte [m]	Bijbehorende hellingspercentage
A15 West → Calandbrug	1	A15 West	Kruising 6	5,9	5	-0,9	910	-0,1%
	2	Kruising 6	Discontinuïteit 6-i	5	5,6	0,6	180	0,3%
	3	Discontinuïteit 6-i	Aansluiting Neckarweg	5,6	7	1,4	290	0,5%
	4	Aansluiting Neckarweg	Kruising 7	7	6,1	-0,9	160	-0,6%
	5	Kruising 7	Kruising 8	6,1	5,1	-1	35	-2,9%
	6	Kruising 8	Calandbrug	5,1	7,72	2,62	175	1,5%
A15 West → Thomassentunnel	1	A15 West	Kruising 1	5,9	5	-0,9	600	-0,2%
	2	Kruising 1	Kruising 3	5	4,8	-0,2	285	-0,1%
	3	Kruising 3	Thomassentunnel	4,8	3,04	-1,76	240	-0,7%
A15 West → N57	1	A15 West	Harmsenbrug	5,9	13,2	7,3	200	3,7%

<i>Calandbrug → A15 West</i>	1	Calandbrug	Kruising 8	7,72	5,1	-2,62	230	-1,1%
	2	Kruising 8	Discontinui- teit 5-i	5,1	10,8	5,7	430	1,3%
	3	Discontinui- teit 5-i	A15 West	10,8	5,9	-4,9	700	-0,7%
<i>Calandbrug → N57</i>	1	Calandbrug	Kruising 8	7,72	5,1	-2,62	175	-1,5%
	2	Kruising 8	Kruising 3	5,1	4,8	-0,3	360	-0,1%
	3	Kruising 3	Discontinui- teit 2-i	4,8	5	0,2	125	0,2%
<i>N57 → Calandbrug</i>	1	Discontinui- teit 3-u	Discontinui- teit 6-i	11,15	5,6	-5,55	100	-5,6%
<i>N57 → Thomassen- tunnel</i>	1	Harmsenbrug	Discontinui- teit 3-u	13,2	11,15	-2,05	100	-2,1%
	2	Discontinui- teit 3-u	Kruising 3	11,15	4,8	-6,35	175	-3,6%
	3	Kruising 3	Thomassen- tunnel	4,8	3,04	-1,76	240	-0,7%
<i>N57 → A15 West</i>	1	Harmsenbrug	Discontinui- teit 3-u	13,2	11,15	-2,05	100	-2,1%
	2	Discontinui- teit 3-u	Kruising 3	11,15	11,15	0	230	0,0%
	3	Kruising 3	Discontinui- teit 5-i	11,15	10,8	-0,35	220	-0,2%
	4	Discontinui- teit 5-i	A15 West	10,8	5,9	-4,9	700	-0,7%
<i>Thomassen- tunnel → A15 West</i>	1	Thomassen- tunnel	Kruising 3	2,61	4,8	2,19	240	0,9%
	2	Kruising 3	Einde uitvoegstrook	4,8	5	0,2	125	0,2%
	3	Einde uitvoegstrook	Kruising 1	5	5	0	160	0,0%
	4	Kruising 1	A15 West	5	5,9	0,9	600	0,2%
<i>Thomassen- tunnel → N57</i>	1	Einde uitvoegstrook	Kruising 1	5	11,35	6,35	185	3,4%
	2	Kruising 1	Harmsenbrug	11,35	13,2	1,85	80	2,3%

Tabel 53 laat zien dat het realistische ontwerp geen wegvakken heeft met een groter hellingspercentage dan volgens Tabel 5.16 van de ROA is toegestaan. Dit betekent dat het verticale alignement van de realistische ontwerpvariant voldoet aan de richtlijnen.

Lengtes in- en uitvoegstroken

De lengtes van de in- en uitvoegstroken zijn afhankelijk van de benodigde acceleratie- en deceleratielengtes. In de realistische ontwerpvariant blijven de meeste in- en uitvoegstroken gelijk aan die van de ideale ontwerpvariant, zoals beschreven in paragraaf 7.3. Enkel discontinuïteiten 2-i, 3-u en 5-u moeten nader worden bekeken om te controleren of de lengtes van deze in- of uitvoegstroken veranderd moeten worden.

Bij invoeging 2-i zijn hebben de toeleidende en doorgaande rijbanen beide een ontwerpsnelheid van 50 km/h om door de bocht met een boogstraal van 80 meter te rijden. Dit betekent dat het verkeer niet extra hoeft te accelereren om op dezelfde snelheid te komen. De lengte van invoegstrook 2-i wordt vanwege de beperkte ruimte 150 meter lang gemaakt.

Bij uitvoering 3-u verandert de snelheid tussen de doorgaande en afbuigende rijbaan niet, omdat beide 50 km/h zijn. Vanwege de beperkte ruimte in deze S-boog, wordt de lengte van de uitvoegstrook 150 meter lang.

Discontinuïteit 5-u is in de realistische ontwerpvariant een toevoeging van een extra rijstrook geworden. Deze extra rijstrook wordt direct na de Harmsenbrug gerealiseerd, zodat het verkeer voldoende ruimte heeft om van rijbaan te wisselen.

Turbulentieafstanden in realistisch ontwerp

In deze paragraaf wordt gecontroleerd of de gehanteerde turbulentielengtes in het realistisch ontwerp voldoen aan de minimale turbulentielengtes volgens Tabel 6.6 van de Richtlijnen Ontwerp Autosnelwegen (ROA). Daarnaast is gekeken naar de gewenste afstand tussen een discontinuïteit en een tunnelingang volgens Tabel 9.6 van de ROA. Tabel 54 geeft een overzicht van de minimaal benodigde en de gehanteerde turbulentieafstanden in het realistische ontwerp.

Tabel 54: Overzicht minimaal benodigde turbulentieafstanden en gehanteerde afstanden in realistisch ontwerp (ROA, 2019)

Verkeersstroom	Afstand tussen	Afstand in ideaal ontwerp [m]	Minimale turbulentie- afstand [m]	Voldoet het ideaal ontwerp?
A15 West → Calandbrug	2-u en 6-i	1435	150	Ja
A15 West → Thomassentunnel	2-u en 4-u	1060	525	Ja
	4-u en 1-i	295	150	Ja
	1-i en tunnel	335	205	Ja
A15 West → N57	4-u en 4-i	310	150	Ja
Calandbrug → A15 West	6-u en 5-i	850	150	Ja
	5-i en 3-i	530	450	Ja
Calandbrug → N57	6-u en 2-i	550	150	Ja
N57 → Calandbrug	3-u en 6-i	180	150	Ja
N57 → Thomassentunnel	5-u en 3-u	115	525	Nee
	3-u en 1-i	110	150	Nee
N57 → A15 West	5-u en 5-1	845	150	Ja
Thomassentunnel → A15 West	Tunnel en 1-u	360	345	Ja
	1-u en 3-i	700	150	Ja
Thomassentunnel → N57	1-u en 2-i	90	150	Nee
	2-i en 4-i	190	450	Nee

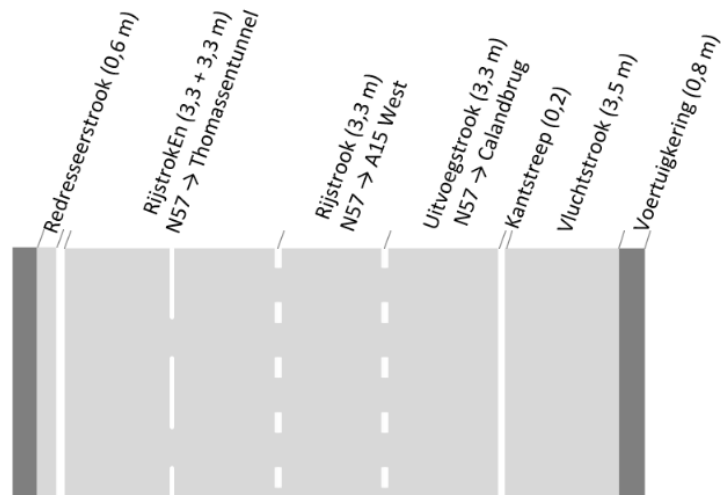
Dwarsprofiel

Hoewel de onderdelen van het dwarsprofiel van de verbindingswegen in de realistische ontwerpvariant hetzelfde blijven als in het ideale ontwerp, moet de benodigde bochtverbreding opnieuw worden berekend voor de bogen met een aangepaste boogstraal. Het berekenen van de benodigde bochtverbreding gebeurt op dezelfde manier als in paragraaf 7.4 en de totale breedte van het dwarsprofiel van de verbindingswegen wordt met behulp van Tabel 49 bepaald. Tabel 55 geeft een overzicht van de totale breedtes van de dwarsprofielen in de realistische ontwerpvariant.

Doordat de verbindingsweg N57 → A15 West in het realistische ontwerp eerst afbuigt naar het oosten, loopt deze verbindingsweg eerst tussen de verbindingswegen N57 → Thomassentunnel en N57 → Calandbrug. Dit betekent dat het dwarsprofiel vanaf de Harmsenbrug tot discontinuïteit 3-u nader moet worden bekeken. Dit dwarsprofiel is weergegeven in Figuur 100 en bevat aan de linkerkant twee rijstroken voor de verbinding N57 → Thomassentunnel, vervolgens één doorgaande rijstrook voor de verbinding N57 → A15 West en aan de rechterkant zit de uitvoegstrook voor de verbinding N57 → Calandbrug. Dit zorgt voor een totale breedte van 19,70 meter.

Tabel 55: Realistische ontwerp: overzicht afmetingen van de onderdelen van het dwarsprofiel per verkeersstroom (ROA, 2019)

Verkeersstroom	Aantal rijstroken	Rijstrook-breedte	Vluchtstrook	Kantstreep (2x toepassen)	Redresseerstrook	Bochtverbreding	Totale breedte
A15 West → Calandbrug (A15 West → 6-i)	1	3,30 m	3,50 m	0,20 m	0,60 m	0,00 m	7,80
A15 West → Calandbrug (6-i → Calandbrug)	2	3,30 m	3,50 m	0,20 m	0,60 m	0,00 m	11,10
A15 West → Thomassentunnel	2	3,50 m	3,50 m	0,20 m	0,60 m	0,00 m	11,50
A15 West → N57	1	3,30 m	3,50 m	0,20 m	0,60 m	0,40 m	8,20
Calandbrug → A15 West	1	3,30 m	3,50 m	0,20 m	0,60 m	0,00 m	7,80
Calandbrug → N57	1	3,30 m	3,50 m	0,20 m	0,60 m	0,20 m	7,80
N57 → Calandbrug	1	3,30 m	3,50 m	0,20 m	0,60 m	0,20 m	8,20
N57 → Thomassentunnel	2	3,30 m	3,50 m	0,20 m	0,60 m	0,20 m	11,50
N57 → A15 West	1	3,30 m	3,50 m	0,20 m	0,60 m	0,40 m	8,20
Thomassentunnel → A15 West	2	3,50 m	3,50 m	0,20 m	0,60 m	0,00 m	11,50
Thomassentunnel → N57	2	3,30 m	3,50 m	0,20 m	0,60 m	0,20 m	11,50



Figuur 100: Schematische weergave samengevoegde dwarsprofiel verbindingswegen N57 → Thomassentunnel/A15 West/Calandbrug met een totale breedte van 19,7 meter

Bijlage 20: Informatie over het opzetten van de microsimulatie in Paramics en SSAM

Deze bijlage presenteert de benodigde informatie voor het opzetten van de microsimulatie in Paramics en SSAM. Hierbij wordt onder andere gekeken naar benodigde input voor beide software en naar de gevolgde stappen voor het opzetten van de microsimulatie modellen.

Paramics

In Paramics wordt het netwerk opgebouwd met wegvakken (links) en knopen (nodes). Nodes zijn punten in het netwerk waar links samenkomen en de links vormen de rijbanen. Voor elke link kunnen de eigenschappen aangepast worden, zoals het snelheidslimiet, het aantal rijstroken, de boogstraal en het type van de weg (snelweg of een stedelijke weg). De eigenschappen van de nodes kunnen ook worden veranderd, waarbij kan worden aangegeven wat de hoogteligging is en of de knoop een normale verbinding, een voorrangskruispunt, een kruispunt met stoplichten of een rotonde is (Systra, z.d.).

Indien de knoop op normaal wordt ingesteld, passeren de voertuigen de knoop zonder beperkingen, terwijl bij een voorrangskruispunt en rotonde kan worden ingesteld welke verkeersstroom voorrang moet verlenen aan het kruisende verkeer. Door de Z-coördinaat van elke knoop in te vullen, wordt de hoogteligging van het netwerk duidelijk. Op basis van de Z-coördinaat van de knopen wordt de helling van de tussenliggende wegvakken automatisch aangepast in Paramics, waardoor het voertuiggedrag automatisch gekalibreerd wordt naar dit hellingspercentage.

In Paramics betreedt of verlaat het verkeer het netwerk met zogenoemde zones. Door meerdere zones aan het netwerk toe te voegen, bijvoorbeeld bij elke arm van het knooppunt, is het mogelijk om verkeer toe te wijzen aan de verschillende routes tussen de zones. Dit levert verschillende Oorsprong-Bestemming(Destination)-paren (OD-paren) op, waarbij wordt aangegeven van welke zone het verkeer komt en naar welke zone het verkeer gaat. De verkeersintensiteit van de routes op de Harmsenknoop kunnen zodoende worden ingeladen in een OD-matrix. Hierbij is het mogelijk om voor personenauto's en vrachtverkeer een aparte OD-matrix in te voeren, waardoor voor elke route het juiste vrachtpercentage kan worden toegepast.

Per simulatie kan in Paramics worden aangegeven welke output verzameld moet worden, voor welke tijdsperiode dit moet gebeuren en hoeveel verschillende runs moeten worden gedaan. De output wordt voor elke run in een aparte map opgeslagen met daarin verschillende CSV-standen (bestanden met door komma's gescheiden waarden) voor de verschillende outputparameters.

Paramics genereert de onder andere de volgende output (Systra, z.d.):

- Intensiteiten [vtg/uur] op elke link per voertuigklasse;
- Gemiddelde snelheid van elke voertuigklasse op elke link;
- Reistijden van elk OD-paar per voertuigklasse;
- Voertuigdetails, zoals XYZ-coördinaten en snelheid per tijdstap (voertuigtrajecten).

Surrogate Safety Assessment Model

Surrogate Safety Assessment Model (SSAM) heeft een bestand met de voertuigtrajecten uit een microsimulatie model, zoals Paramics, nodig als input. Dit zogenoemde trj-bestand vereist een specifieke opbouw, zodat SSAM de juiste informatie in het juiste formaat krijgt toegewezen. In de handleiding van SSAM worden de vereisten aan het inputbestand omschreven. Zo moet het inputbestand een Format en Dimensie beschrijving bevatten en moeten vervolgens per tijdstap alle voertuigen met bijbehorende XY-coördinaten worden toegevoegd.

Om alle CSV-bestanden met daarin de informatie over de voertuigtrajecten uit Paramics te analyseren en vervolgens om te zetten naar een trj-bestand met de juiste indeling, is in Python een code geschreven. Deze code is weergegeven in Bijlage 21. Als het trj-bestand is ingevoegd, voert SSAM vanzelf de conflictenanalyse uit en wordt onder andere de volgende output verkregen (U.S. Department of Transportation, z.d.):

- Het aantal voorspelde conflicten, inclusief de locatie en het type conflict;
- Waarde voor de Time-to-collision (TTC);
- Waarde voor de Post-Encroachment Time (PET) = tijd na inbreuk op in de conflictzone;
- Snelheidsverschil (DeltaS) tussen de betrokken voertuigen;
- Maximale snelheidsverschil tussen snelheden voor en na het conflict.

Huidige ontwerp in Paramics en SSAM

Het opzetten van de microsimulatie in Paramics en SSAM wordt gedaan met het huidige ontwerp van de Harmsenknoop, zodat het model gekalibreerd kan worden met behulp van de realistische gegevens van de huidige situatie.

Opzetten van het microsimulatie model in Paramics

De volgende stappen zijn gevolgd voor het opzetten van de microsimulatie in Paramics:

1. Uit OpenStreetMap is een kaart van het gebied rond de Harmsenknoop gedownload en deze kaart is als achtergrond ingevoegd in Paramics.
2. Het huidige ontwerp van de Harmsenknoop wordt opgebouwd met nodes en links, waarbij de wegvakken worden overgetrokken van de kaart van OpenStreetMap. Op deze manier komt het model overeen met de daadwerkelijke afmetingen en boogstralen van het huidige ontwerp.
3. De hoogte van de nodes tussen de wegvakken in het model wordt aangepast op basis van gegevens van het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN) en technische tekeningen van de Harmsenbrug, Calandbrug en Thomassentunnel.
4. De lengte van de in- en uitvoegstroken worden verlengd tot de daadwerkelijk lengte volgens de kaart uit OpenStreetMap.
5. De waarnemingsafstanden van de nodes in het model worden ingevoerd op basis van de locatie van bewegwijzeringsborden en de lengte van in- en uitvoegstroken.
6. De eigenschappen van de wegvakken zijn aangepast op basis van de wegcategorie van de wegen. De wegvakken die aansluiten op de twee voorrangskruispunten van de route A15 West → N57 en op de rotonde bij de Moezelweg, zijn ingedeeld in de categorie Stedelijk (Urban). Alle andere wegvakken zijn ingedeeld in de categorie Snelweg (Highway).
7. De snelheidslimieten van de wegvakken zijn ingesteld op basis van de snelheidsborden in het huidige ontwerp. Hierbij wordt voor een scherpe bocht, zoals bij de route Thomassentunnel → N57, de snelheidslimiet stapsgewijs afgebouwd door de snelheidslimiet van de voorgaande wegvakken in stappen af te laten nemen.

Voor het instellen van de intensiteiten, de percentages van de verschillende voertuigcategorieën en de manier van inladen van voertuigen in het model, zijn de volgende keuzes gemaakt:

8. Er zijn vier zones toegevoegd in het model, waar voertuigen het netwerk kunnen betreden of verlaten. Deze zones liggen op de A15 West ter hoogte van hectometer 34,6 (Zone 1), op de N57 ter hoogte van hectometer 3,3 (Zone 2), op de N15 op de Calandbrug nabij hectometer 36,9 (Zone 3) en op de A15 Oost in de Thomassentunnel nabij hectometer 36,9 (Zone 4).
9. Aan de hand van de vier zones worden voor zowel de ochtendspits als de avondspits aparte OD-matrices (Origin-Destination matrices) opgesteld, zodat de verkeersintensiteiten kunnen worden ingeladen. In de werkelijkheid is in de ochtendspits de ene richting maatgevend, terwijl in de

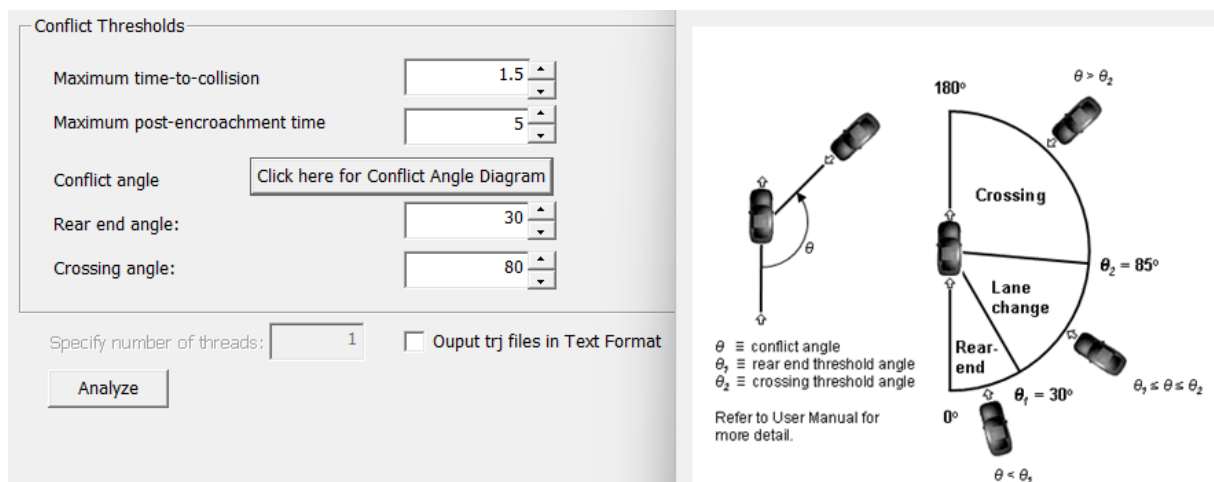
avondspits de andere richting maatgevend is. De ochtend- en avondspits worden apart bekeken om te voorkomen dat in het model een verkeerssituatie gecreëerd wordt, waarbij beide richtingen tegelijkertijd maatgevend zijn.

10. Omdat het vrachtpercentage per OD-paar varieert, worden de intensiteiten voor personenauto's en vrachtverkeer in afzonderlijke OD-matrices ingevoerd. Door voor elk OD-paar het aantal personenauto's en vrachtwagens op te nemen in deze matrices, blijft het juiste vrachtpercentage behouden wanneer beide matrices gelijktijdig in het model worden ingeladen. Het is van belang te vermelden dat dit zowel voor de ochtend- als avondspits moet worden gedaan, wat resulteert in twee matrices per spitsperiode en dus vier OD-matrices in totaal.
11. Binnen de categorieën personenauto's en vrachtverkeer worden meerdere voertuigtypen ("Vehicle proportions") onderscheiden. De categorie personenauto's bestaat uit "Cars" en "Light Goods Vehicles", met een verdeling van respectievelijk 80% en 20%. De categorie vrachtverkeer bestaat uit "Medium Goods Vehicles" en "Heavy Goods Vehicles", met een verdeling van respectievelijk 20% en 80%.
12. Het is mogelijk om een spitsprofiel in te laden, waarbij de verdeling van het verkeer gedurende de spits kan worden aangepast. Voor dit model is gekozen voor een vlak spitsprofiel, waarbij de maatgevende intensiteit elk uur opnieuw wordt ingeladen. Hierdoor wordt het ontwerp getoetst op het maatgevende uur (afzonderlijk voor de ochtend- en avondspits), waarbij wordt aangenomen dat ook de geleidelijk opbouwende spits kan worden verwerkt, mits het ontwerp in staat is het verkeer tijdens het maatgevende uur af te wikkelen.

Opzetten van het model in SSAM

Het opzetten van het model in SSAM bestaat uit twee onderdelen: het bepalen van de grenswaarden van de conflictparameters en het opstellen van een trj-bestand.

SSAM voert de conflictenanalyse automatisch uit, maar voordat de analyse wordt gestart, is het mogelijk om grenswaarden voor de conflictparameters aan te geven op het beginscherm. Daarnaast bepaalt SSAM op basis van de hoek tussen de betrokken voertuigen bij een conflict (conflict angle) het type conflict, waarbij gekozen kan worden tussen "Rear End", "Lane Change" en "Crossing" conflicten. Voor dit onderzoek zijn de standaardwaarden voor de conflictparameters en -hoeken uit SSAM gebruikt. Deze waarden zijn weergegeven in Figuur 101.



Figuur 101: Overzicht waardes van conflictparameters in SSAM en toelichting van de conflicthoeken (SSAM, 2025)

Bepaling van de standaarddeviaties van de testruns

Om te bepalen hoeveel runs nodig zijn om tot het gewenste betrouwbaarheidsniveau te komen, kan de volgende formule worden toegepast (Barceló, 2010):

$$\text{Aantal runs:} \quad n = \frac{2 * z^2 * \sigma^2}{\delta^2} \quad (18)$$

Waarbij:

- **n** = het aantal benodigde runs
- **z** = de significantie (1,96 voor 95% betrouwbaarheid)
- **σ** = de standaardafwijking, tussen de verschillende testruns
- **δ** = het verschil dat gezien moet kunnen worden

Voor het bepalen van de standaardafwijking (σ) worden vijf testruns uitgevoerd van de avondspits, waarvan het gemiddelde wordt genomen. Deze testruns zijn korter dan de reguliere simulatie-runs (10 minuten in plaats van 2 uur). Paramics past in dit geval automatisch de invoerde intensiteit aan door één zesde (10/60) van de uur intensiteit te hanteren zodat de verkeersbelasting in tien minuten evenredig overeenkomt met die van een volledig uur.

Bij elke de testrun wordt van de tien verkeersstromen op de Harmsenknoop het aantal voertuigen op de representatieve wegvakken, de reistijd van de routes en de gemiddelde snelheid op de routes bepaald uit de resultaten van Paramics. Vervolgens wordt in Python de bijbehorende standaarddeviatie per route berekend. De σ die in vergelijking 17 wordt ingevuld is de gemiddelde standaarddeviatie van de tien routes.

Voor het aantal voertuigen op de representatieve wegvakken per testrun wordt in Figuur 102 de berekening uit Python weergegeven. De berekening van de standaarddeviatie van de reistijden en snelheden wordt op gelijke wijze gedaan. Hieruit volgen de volgende gemiddelden van de standaarddeviaties:

- $\sigma_{\text{aantal voertuigen}}$: 1,988
- $\sigma_{\text{reistijden}}$: 4,993
- $\sigma_{\text{snelheden}}$: 1,601

Deze waarden voor δ worden in paragraaf 10.4 gebruikt om het aantal benodigde runs te bepalen.

	Aantal voertuigen per route	Testrun 1	Testrun 2	Testrun 3	Testrun 4	Testrun 5	Gem	Std Dev
0	A15 West -> Calandbrug	12	10	12	12	13	11.8	1.095
1	A15 West -> Tunnel	265	260	259	260	256	260.0	3.240
2	A15 West -> N57	28	28	27	28	29	28.0	0.707
3	Calandbrug -> A15 West	4	4	5	5	4	4.4	0.548
4	Calandbrug -> N57	61	60	61	62	60	60.8	0.837
5	N57 -> Calandbrug	58	60	60	63	62	60.6	1.949
6	N57 -> Tunnel	118	117	112	112	112	114.2	3.033
7	N57 -> A15 West	6	9	9	9	9	8.4	1.342
8	Tunnel -> A15 West	118	113	123	127	120	120.2	5.263
9	Tunnel -> N57	262	259	258	262	259	260.0	1.871

```
gem_std_link_counts = df_test_AS_hh["Std Dev"].mean()
print(f"Gemiddelde std voor het aantal voertuigen = {gem_std_link_counts:.3f}")
Gemiddelde std voor het aantal voertuigen = 1.988
```

Figuur 102: Berekening in Python van de gemiddelde standaarddeviatie van het aantal voertuigen bij de testruns

Bijlage 21: Python code voor trj-bestanden van SSAM

In deze bijlage wordt de Python code voor het generen van de trj-bestanden weergegeven. Deze bestanden vormen de input voor conflictanalyse in SSAM. Hierbij worden de CSV-bestanden met de voertuigtrajecten van Paramics omgezet naar een trj-bestand met de juiste indeling voor SSAM.

Python code

```
import pandas as pd
import struct
import glob

# Pad naar de CSV-bestanden (alle CSV's in dezelfde map)
csv_files = glob.glob("Goed_huidige_situatie_huidige_i/Totaal_huidig_huidig/9/Carpositions/*.csv")

# Verzamel alle data in één dataframe
all_df = pd.DataFrame()
for csv_file in csv_files:
    print(f"Bezig met het verwerken van bestand: {csv_file}")

    # Laad elke CSV in een tijdelijke dataframe
    df = pd.read_csv(csv_file)

    # Voeg toe aan de gecombineerde dataframe
    all_df = pd.concat([all_df, df], ignore_index=True)
    print(f"Bestand {csv_file} is verwerkt.")

# Zorg ervoor dat de snelheid in m/s wordt berekend
all_df["Speed_mps"] = all_df["Speed (kph)"] / 3.6

# Unieke tijdstappen en voertuigen
unique_times = sorted(all_df["Timestamp"]).unique()

# DIMENSIONS-bepaling (geheel getal vereist)
min_x = int(all_df["PosX (m)"].min())
max_x = int(all_df["PosX (m)"].max())
min_y = int(all_df["PosY (m)"].min())
max_y = int(all_df["PosY (m)"].max())
if min_y >= max_y:
    min_y, max_y = max_y - 1, max_y

# Open het nieuwe trajectory bestand
with open("input_ssam_totaal_huidig_huidig_9.trj", "wb") as f:
    # FORMAT record (6 bytes)
    f.write(struct.pack("<B", 0)) # FORMAT type
    f.write(b"L") # Endian = Little
    f.write(struct.pack("<f", 1.04)) # Version 1.04
    # DIMENSIONS record (19 bytes)
    f.write(struct.pack("<B", 1)) # DIMENSIONS type
    f.write(struct.pack("<B", 1)) # Metric units
    f.write(struct.pack("<f", 1.0)) # Scale 1 meter per unit
    f.write(struct.pack("<i", min_x)) # Min X
    f.write(struct.pack("<i", min_y)) # Min Y
    f.write(struct.pack("<i", max_x)) # Max X
    f.write(struct.pack("<i", max_y)) # Max Y
    print("DIMENSIONS record toegevoegd aan .trj bestand.")
    # TIMESTEP + VEHICLES
    total_timesteps = len(unique_times)
```

```

for index, time in enumerate(unique_times):
    timestep_df = all_df[all_df["Timestamp"] == time]

    # Schrijf TIMESTEP record
    f.write(struct.pack("<B", 2))    # TIMESTEP record
    f.write(struct.pack("<f", time))  # Tijd in sec

    # Gegevens van voertuigen schrijven
    for _, row in timestep_df.iterrows():
        try:
            vehicle_id = int(row["Tag number"])
            lane = int(row["Lane"]) if not pd.isna(row["Lane"]) else 1
            front_x = float(row["PosX (m)"])
            front_y = float(row["PosY (m)"])
            speed = float(row["Speed_mps"])
            accel = float(row["Acceleration (mpss)"])

            # Aannames over voertuigafmetingen
            length = 4.5
            width = 1.8
            rear_x = front_x - length
            rear_y = front_y

            # VEHICLE record (47 bytes)
            f.write(struct.pack("<B", 3))    # VEHICLE type
            f.write(struct.pack("<i", vehicle_id)) # Vehicle ID
            f.write(struct.pack("<i", 0))    # Link ID (placeholder)
            f.write(struct.pack("<B", lane))  # Lane ID
            f.write(struct.pack("<f", front_x)) # Front X
            f.write(struct.pack("<f", front_y)) # Front Y
            f.write(struct.pack("<f", rear_x)) # Rear X
            f.write(struct.pack("<f", rear_y)) # Rear Y
            f.write(struct.pack("<f", length)) # Length
            f.write(struct.pack("<f", width)) # Width
            f.write(struct.pack("<f", speed)) # Speed
            f.write(struct.pack("<f", accel)) # Acceleration

        except Exception as e:
            print(f"Rij overgeslagen door fout: {e}")

    # Voortgang bijhouden
    #print(f"Tijdstap {index + 1}/{total_timesteps} verwerkt.")
    # Voortgang elke 100 tijdstappen
    if (index + 1) % 100 == 0:
        print(f"Tijdstap {index + 1}/{total_timesteps} verwerkt.")
print(f"Bestand output_ssam.trj is succesvol gegenereerd.")

```

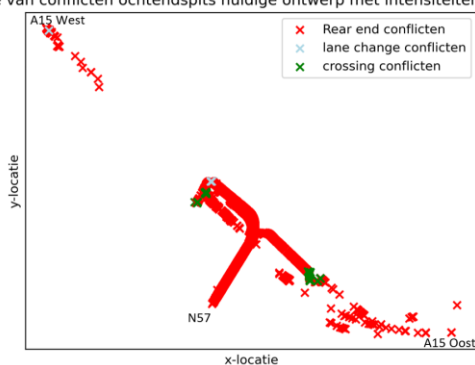
Bijlage 22: Overzicht locaties en typering van conflicten uit SSAM voor huidige ontwerp met huidige intensiteit

Deze bijlage presenteert in Figuur 103 en Figuur 104 de locatie van de verwachte conflicten zoals voorspeld door de SSAM-conflictanalyse voor zowel de ochtend- als de avondspits, op basis van het huidige ontwerp in combinatie met de huidige verkeersintensiteiten volgens het INWEVA. Daarnaast wordt in Figuur 105 en Figuur 106 de verdeling weergegeven van de verschillende typen conflicten: rear end (kop-staartbotsingen), lane change (rijstrookwissels) en crossing (kruisingen).

Het type conflict wordt in SSAM automatisch bepaald op basis van de hoek tussen de betrokken voertuigen op het moment van conflict, zoals toegelicht in paragraaf 10.3. Hierdoor ontstaat een vertekening bij voorrangskruisingen in het huidige ontwerp, waar voertuigen elkaar kruisen onder een hoek van circa 55 graden. SSAM classificeert deze situaties onterecht als lane change conflicten, terwijl het in werkelijkheid om crossing conflicten gaat.

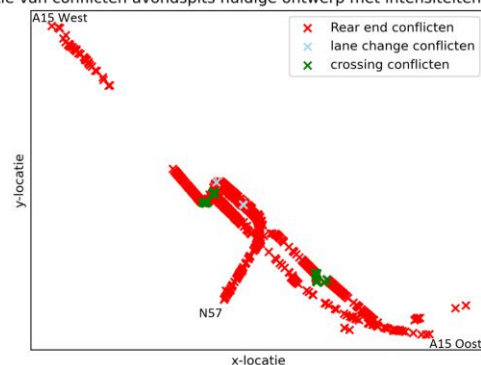
Om dit te corrigeren, zijn de lane change conflicten op deze locaties handmatig omgezet naar crossing conflicten. Deze correctie is uitgevoerd op basis van de XY-coördinaten van de conflicten, zodat alleen conflicten op de fysieke locatie van de voorrangskruisingen en de rotonde nabij de Mozelweg zijn aangepast.

Locatie van conflicten ochtendspits huidige ontwerp met intensiteiten van 2023



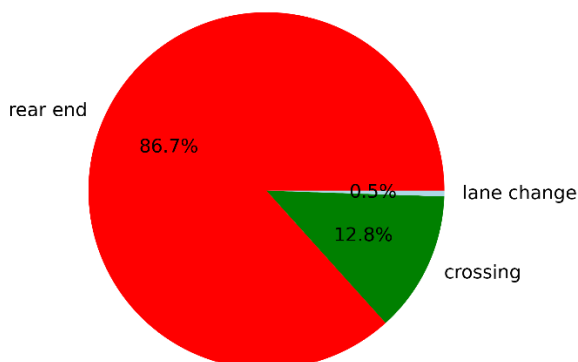
Figuur 103: Locatie van conflicten uit SSAM: ochtendspits huidige ontwerp met huidige intensiteiten

Locatie van conflicten avondspits huidige ontwerp met intensiteiten van 2023



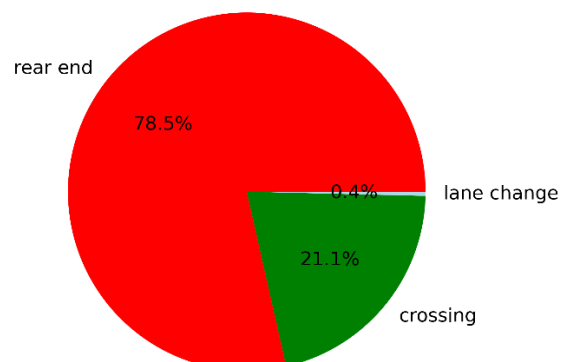
Figuur 104: Locatie van conflicten uit SSAM: avondspits huidige ontwerp met huidige intensiteiten

Verdeling conflict types ochtendspits huidige ontwerp met intensiteiten van 2023 (totaal aantal conflicten: 832)



Figuur 105: Verdeling van conflicten uit SSAM: ochtendspits huidige ontwerp met huidige intensiteiten

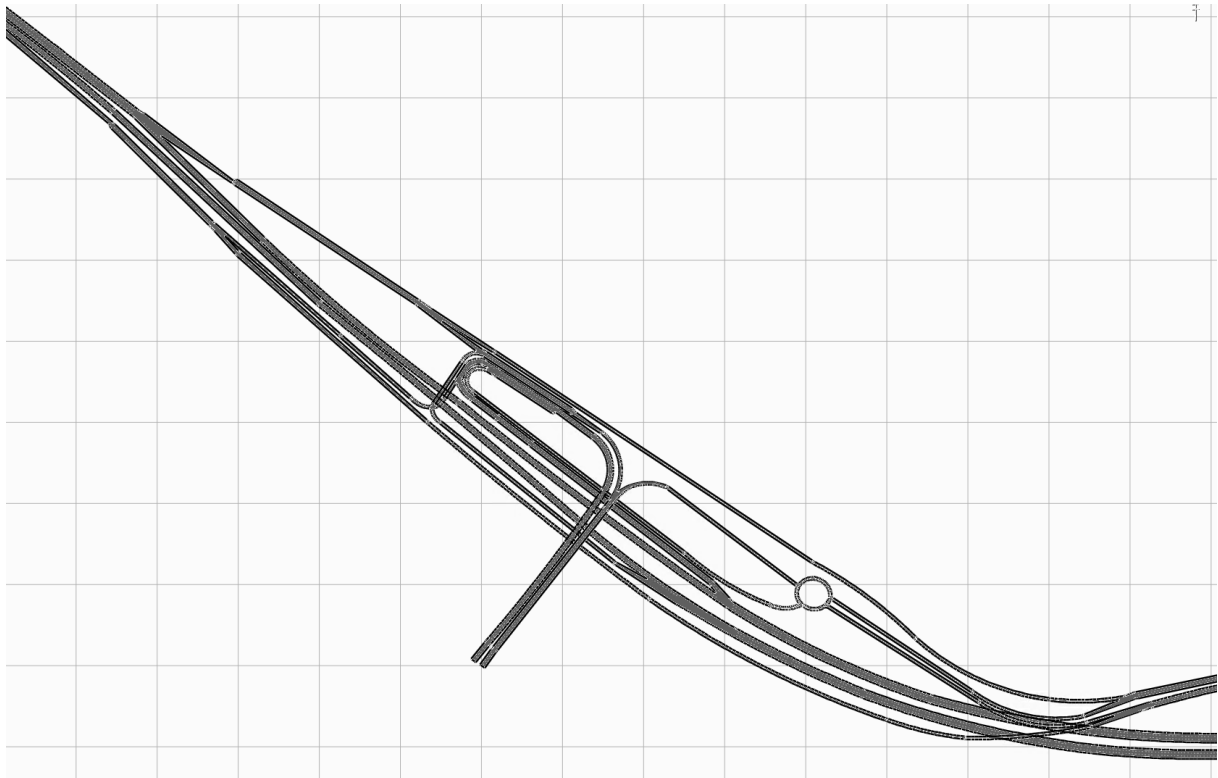
Verdeling conflict types avondspits huidige ontwerp met intensiteiten van 2023 (totaal aantal conflicten: 1131)



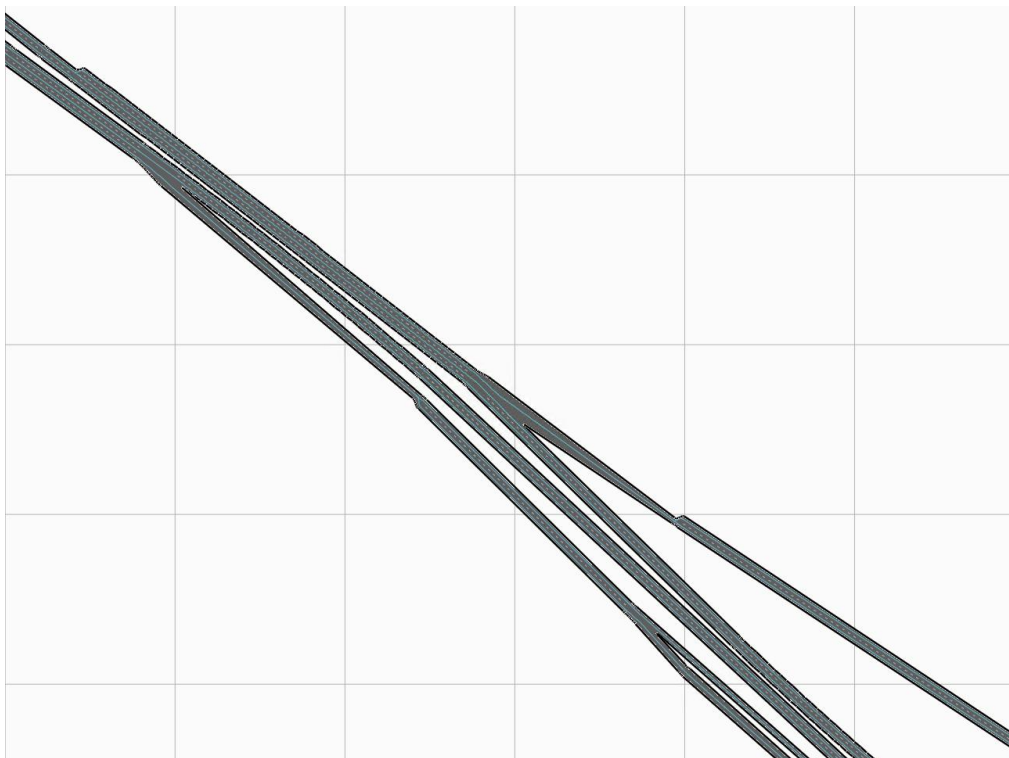
Figuur 106: Verdeling van conflicten uit SSAM: avondspits huidige ontwerp met huidige intensiteiten

Bijlage 23: Huidige ontwerp in microsimulatie model

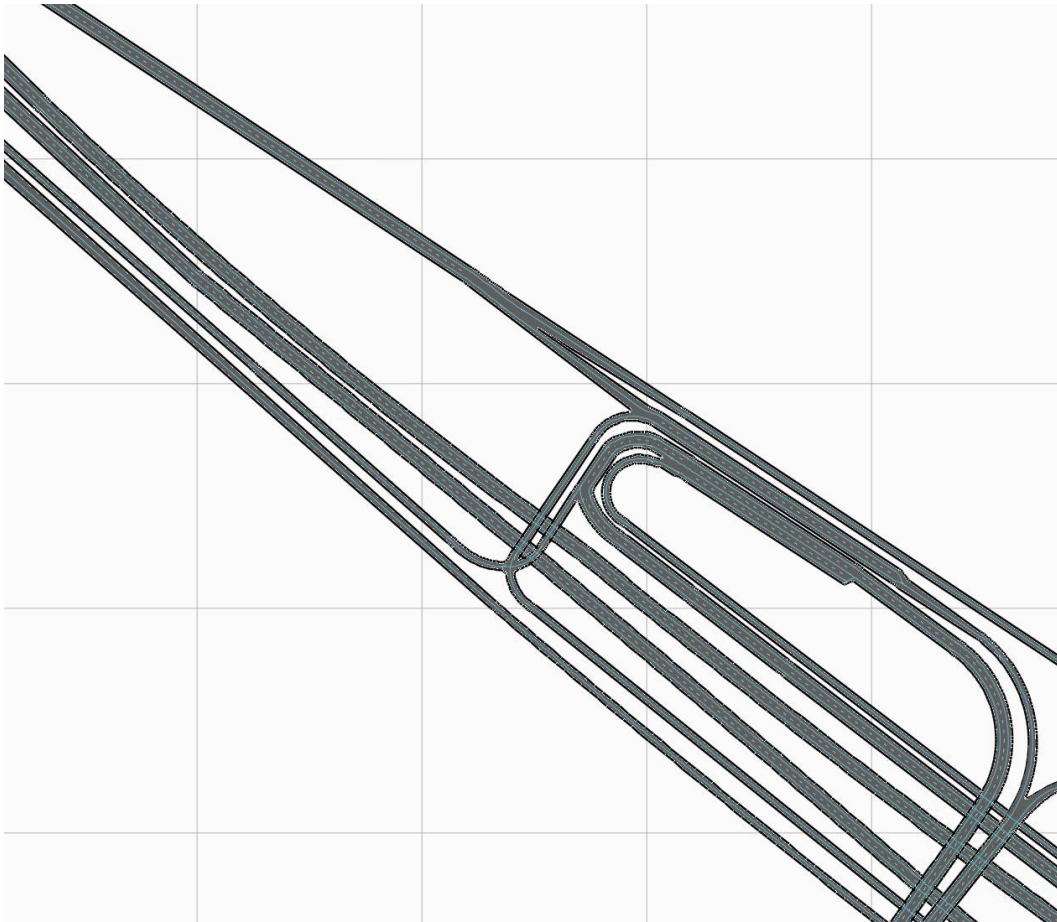
In deze bijlage wordt het huidige ontwerp in het microsimulatie model Paramics weergegeven. Figuur 107 geeft een globaal overzicht van het huidige ontwerp. Vervolgens wordt ingezoomd op het ontwerp, zodat met vier figuren de delen van het ideale ontwerp wordt weergegeven. Het ontwerp wordt opgesplitst in de delen: links, links-midden, rechts-midden, rechts.



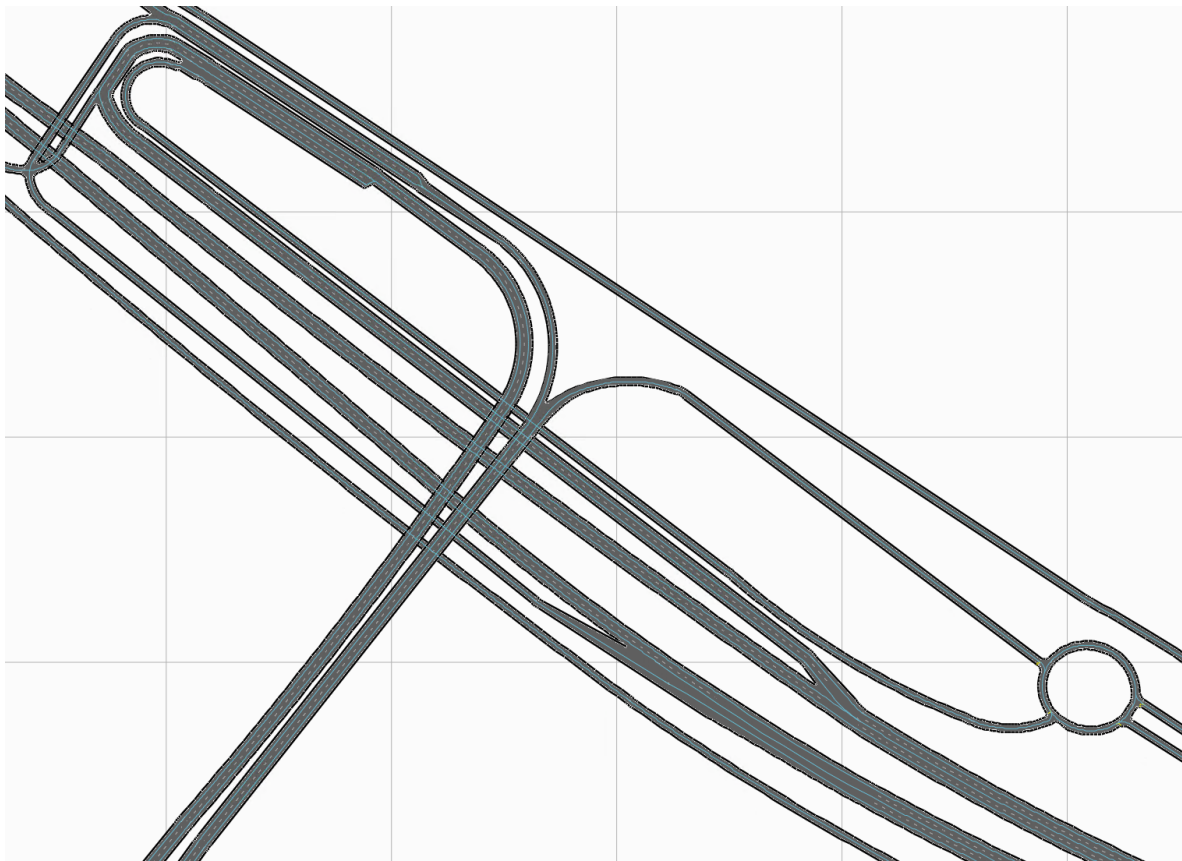
Figuur 107: Globaal overzicht van het huidige ontwerp in het microsimulatie model Paramics



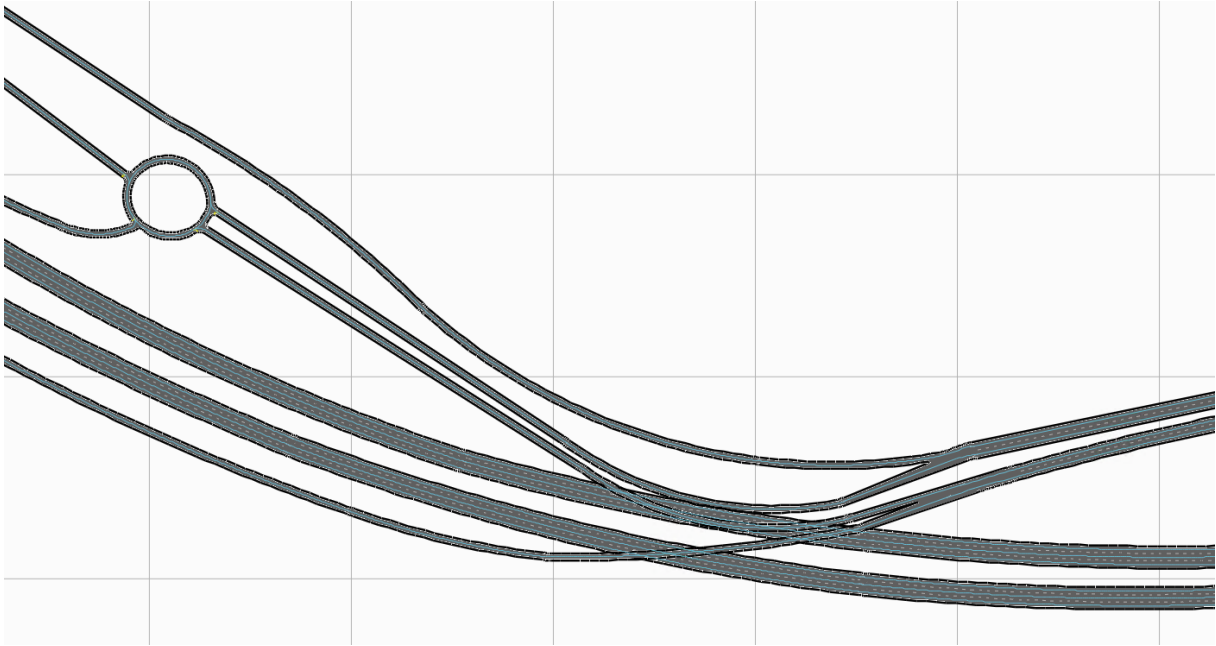
Figuur 108: Ingezoomde weergave van het huidige ontwerp in Paramics deel links



Figuur 109: Ingezoomde weergave van het huidige ontwerp in Paramics deel links-midden



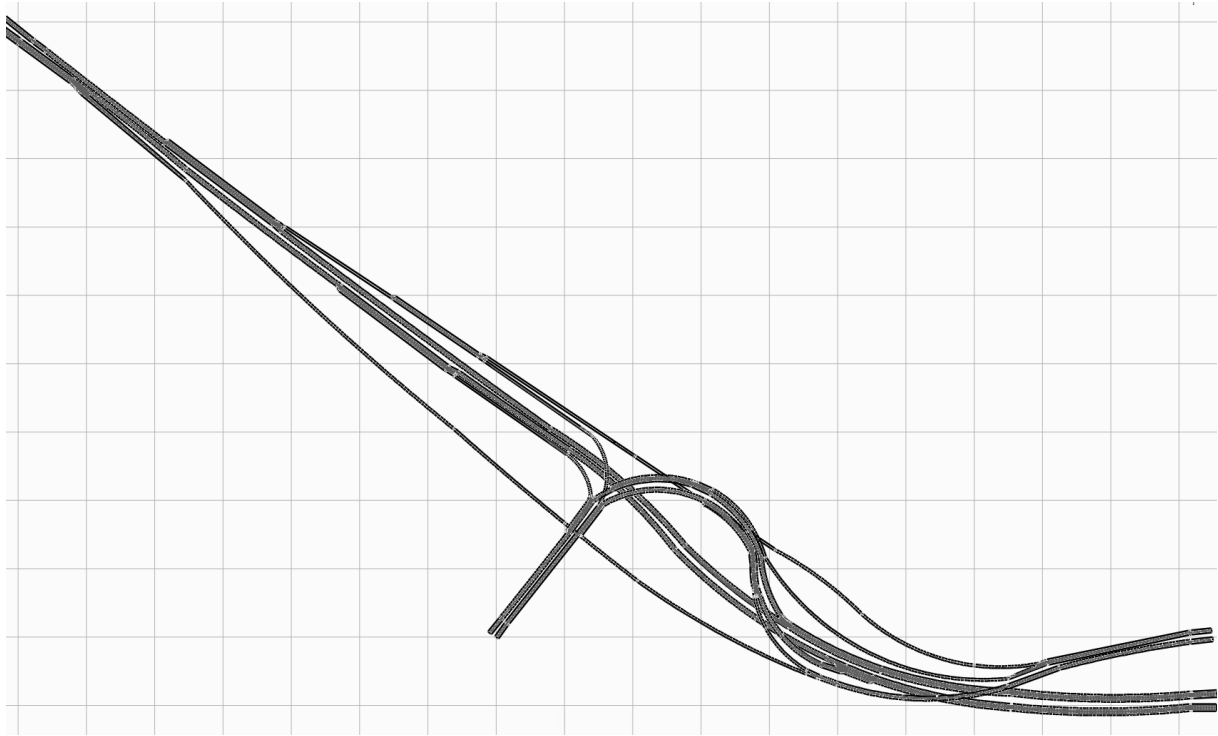
Figuur 110: Ingezoomde weergave van het huidige ontwerp in Paramics deel rechts-midden



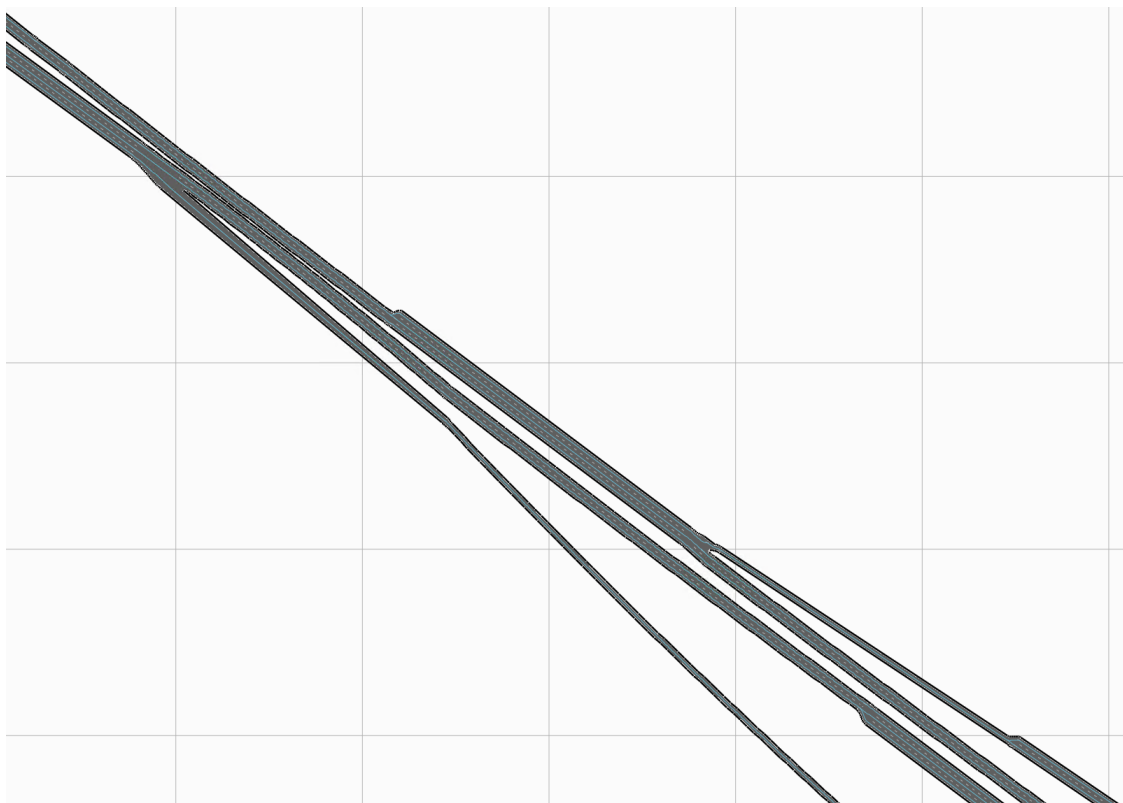
Figuur 111: Ingezoomde weergave van het huidige ontwerp in Paramics deel rechts

Bijlage 25: Ideale ontwerp in microsimulatie model

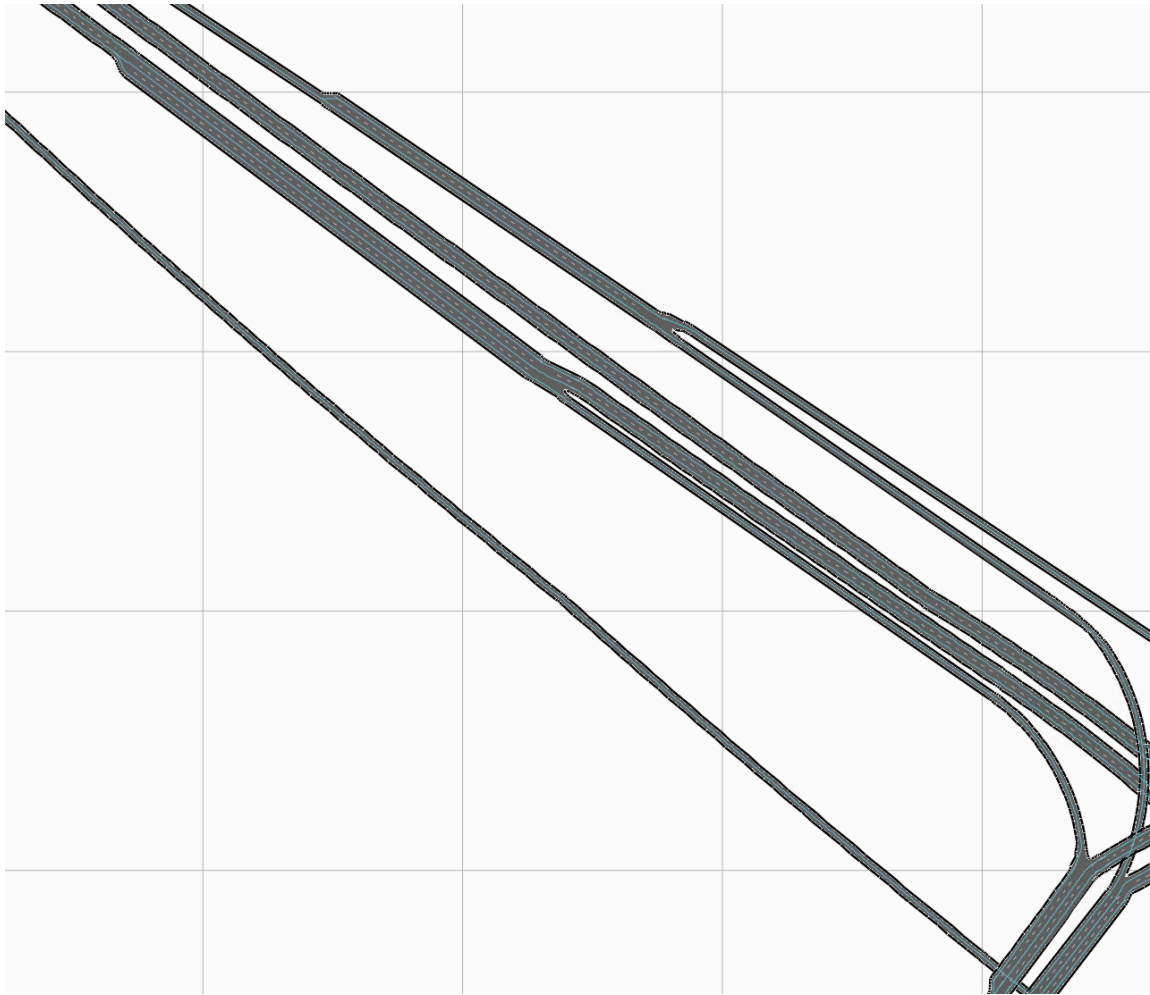
In deze bijlage wordt het ideale ontwerp in het microsimulatie model Paramics weergegeven. Figuur 113 geeft een globaal overzicht van het ideale ontwerp. Vervolgens wordt ingezoomd op het ontwerp, zodat met vier figuren de delen van het ideale ontwerp wordt weergegeven. Het ontwerp wordt opgesplitst in de delen: links, links-midden, rechts-midden, rechts.



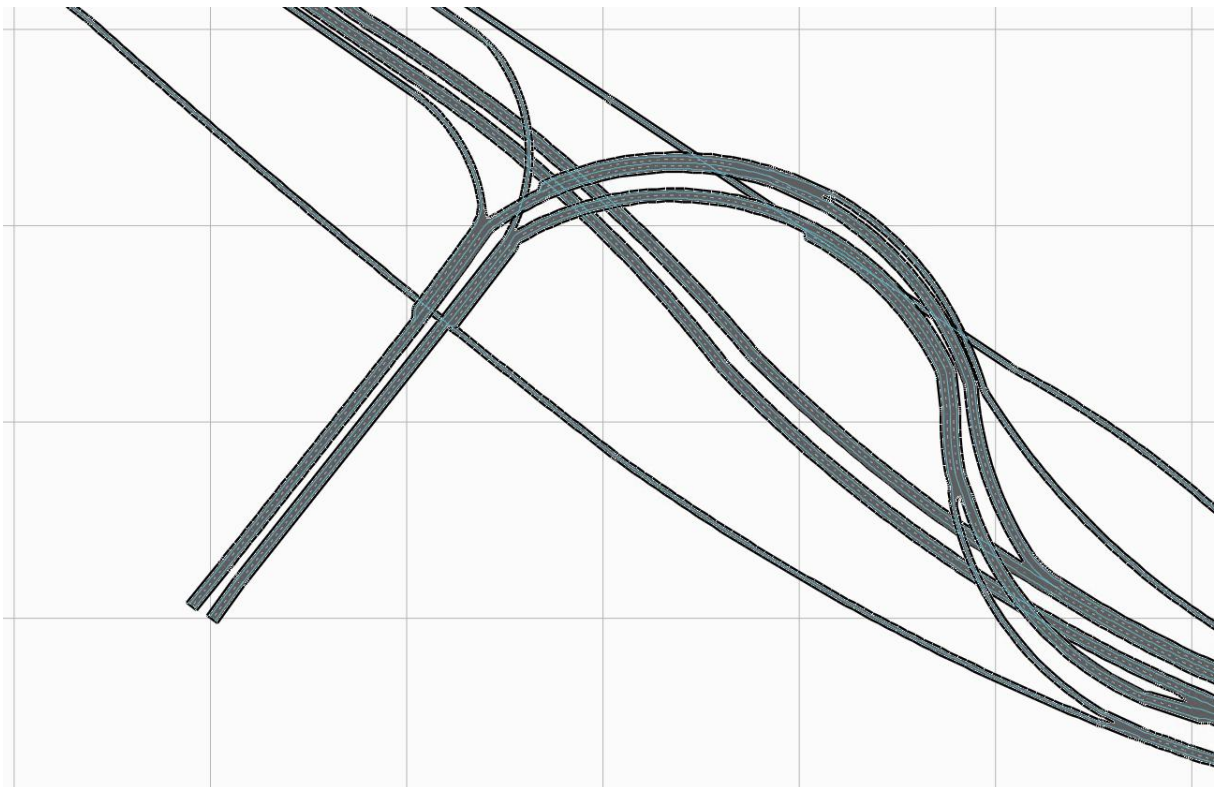
Figuur 113: Globaal overzicht van het ideale ontwerp in het microsimulatie model Paramics



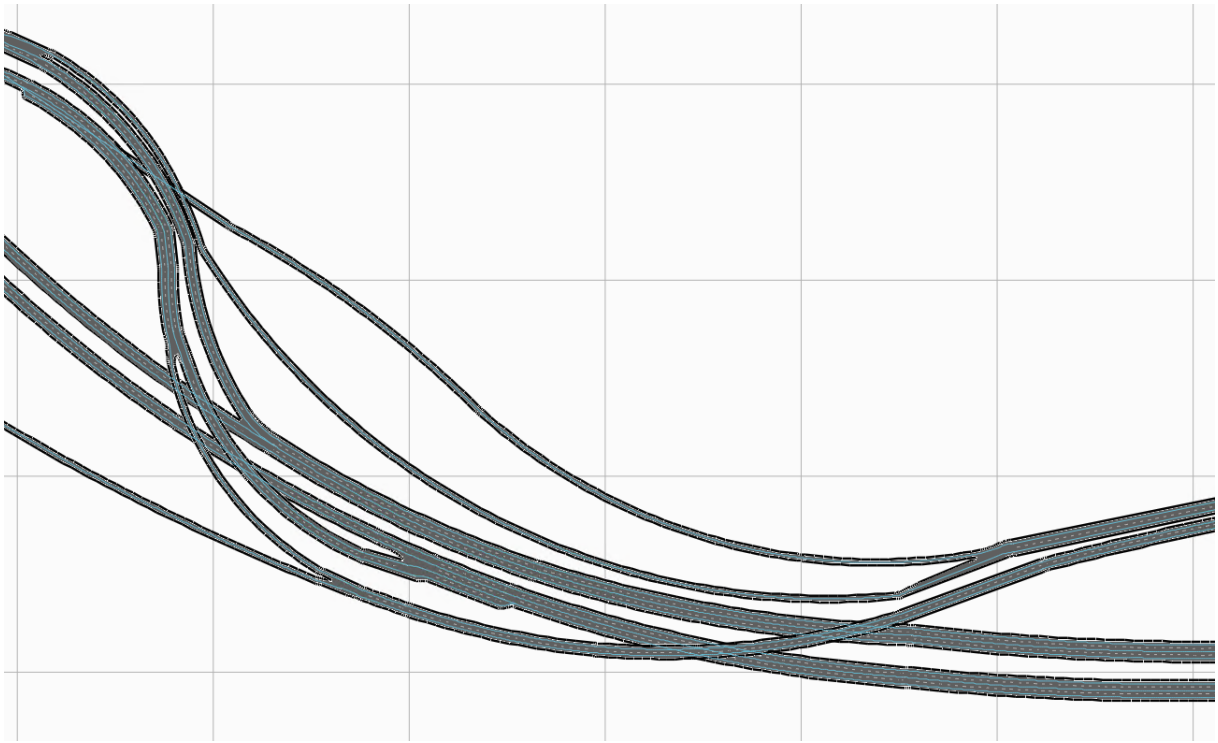
Figuur 114: Ingezoomde weergave van het ideale ontwerp in Paramics deel links



Figuur 115: Ingezoomde weergave van het ideale ontwerp in Paramics deel links-midden



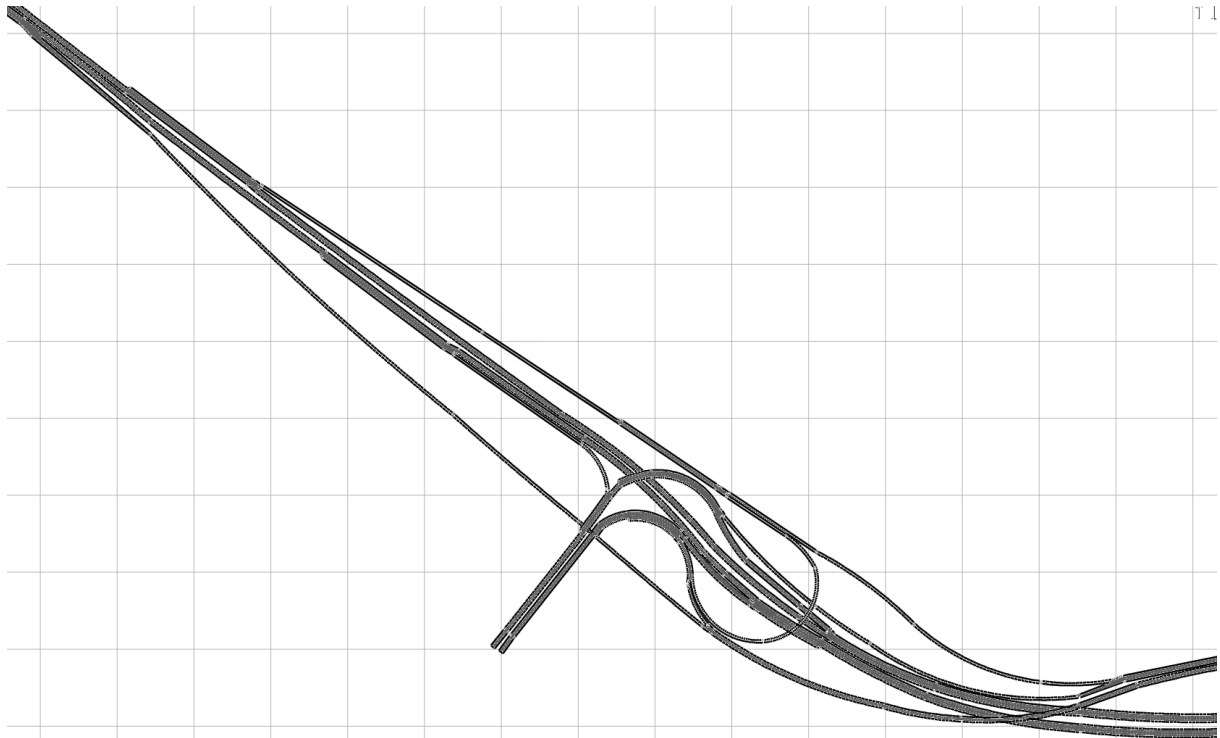
Figuur 116: Ingezoomde weergave van het ideale ontwerp in Paramics deel rechts-midden



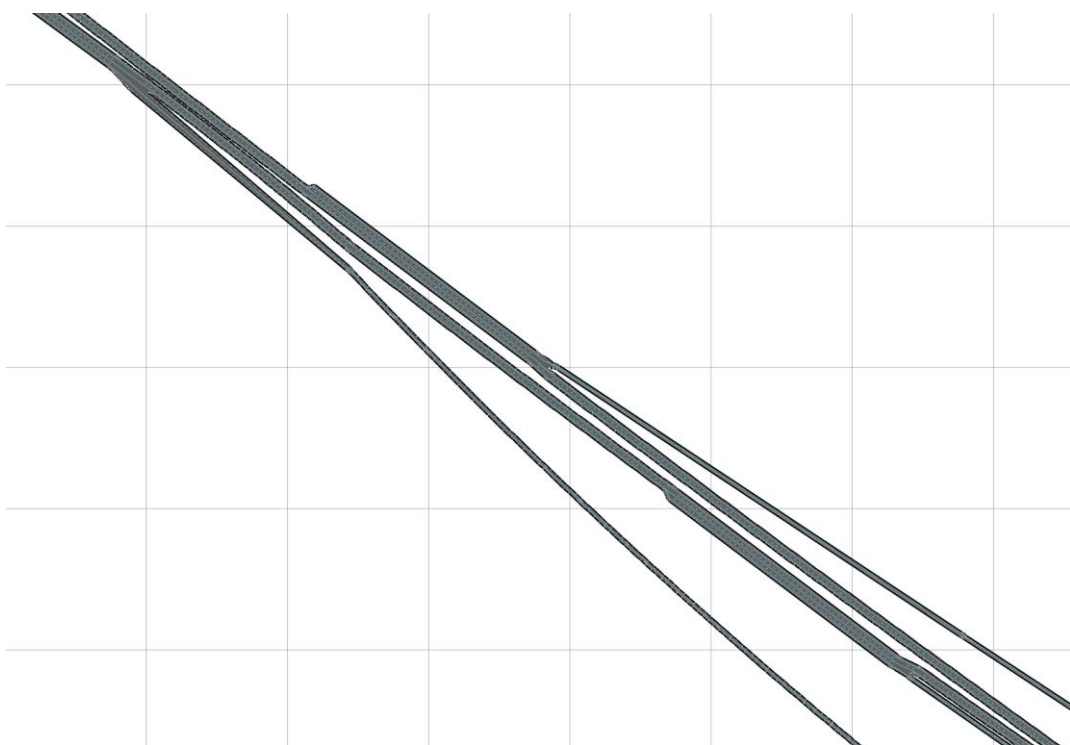
Figuur 117: Ingezoomde weergave van het ideale ontwerp in Paramics deel rechts

Bijlage 26: Realistische ontwerp in microsimulatie model

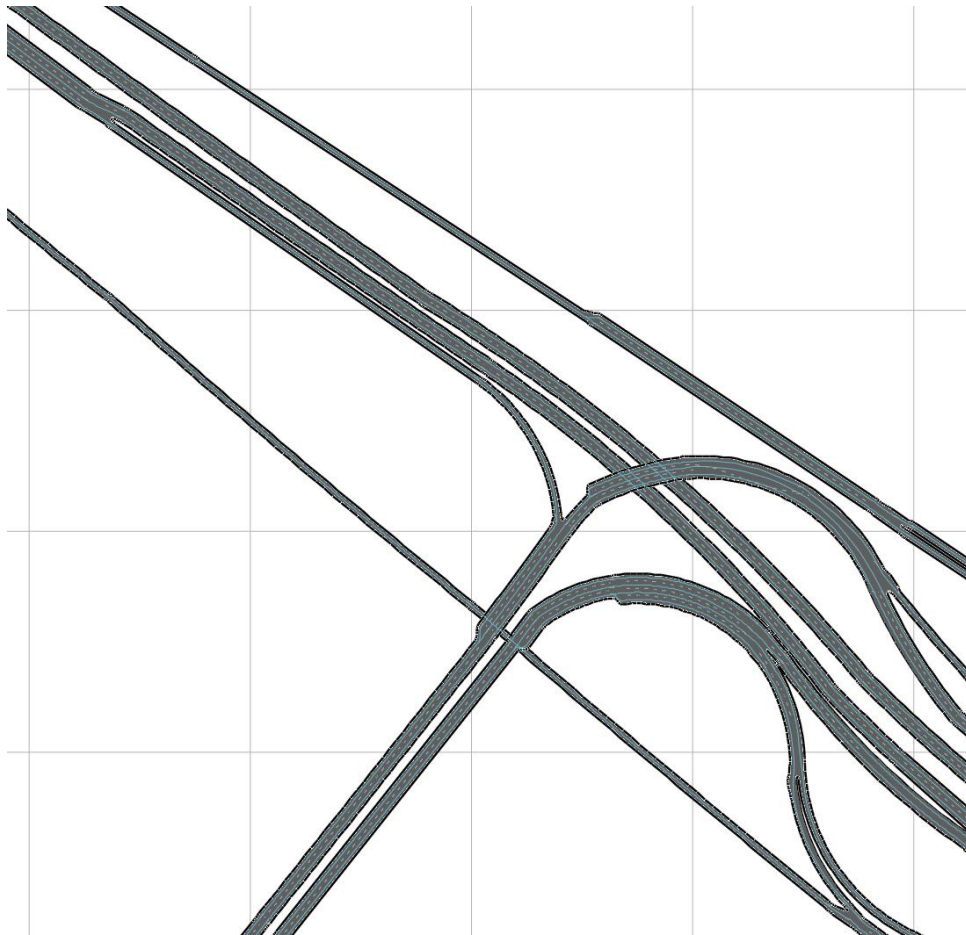
In deze bijlage wordt het realistische ontwerp in het microsimulatie model Paramics weergegeven. Figuur 118 geeft een globaal overzicht van het realistische ontwerp. Vervolgens wordt ingezoomd op het ontwerp, zodat met vier figuren de delen van het realistische ontwerp wordt weergegeven. Het ontwerp wordt opgesplitst in de delen: links, links-midden, rechts-midden, rechts.



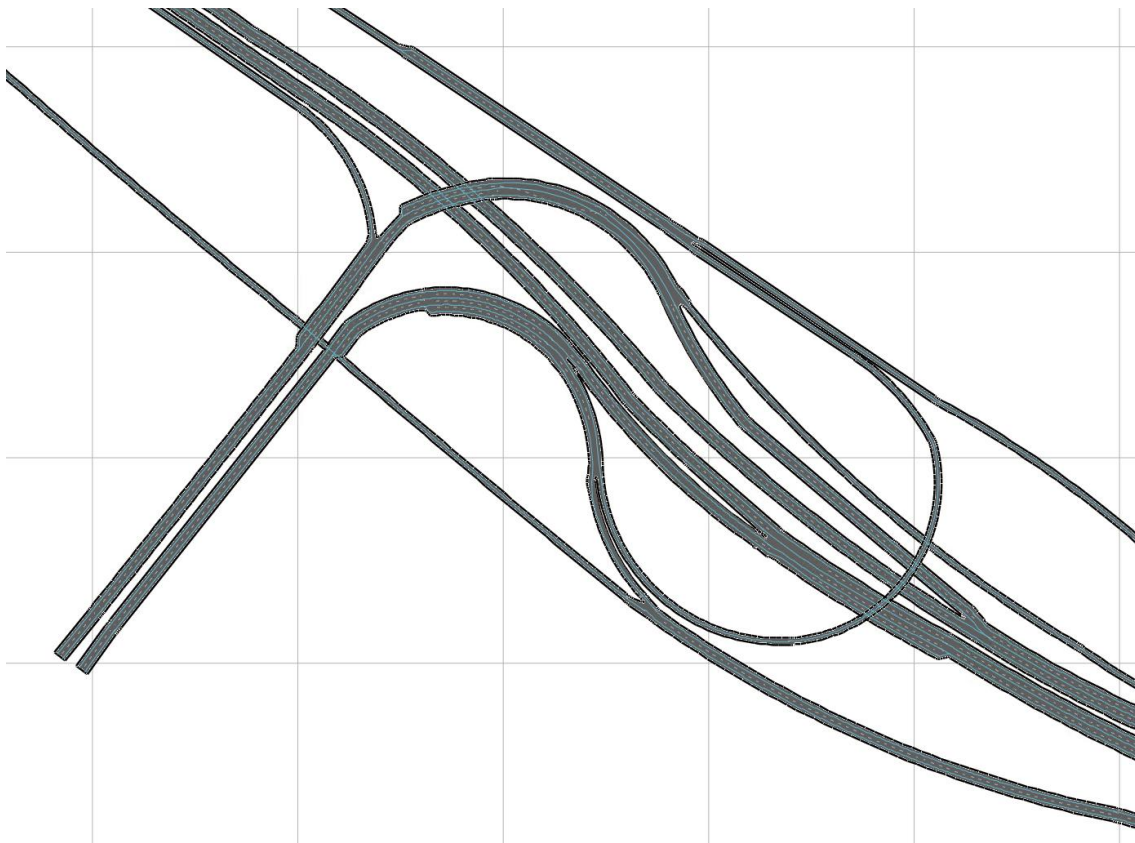
Figuur 118: Globaal overzicht van het realistische ontwerp in het microsimulatie model Paramics



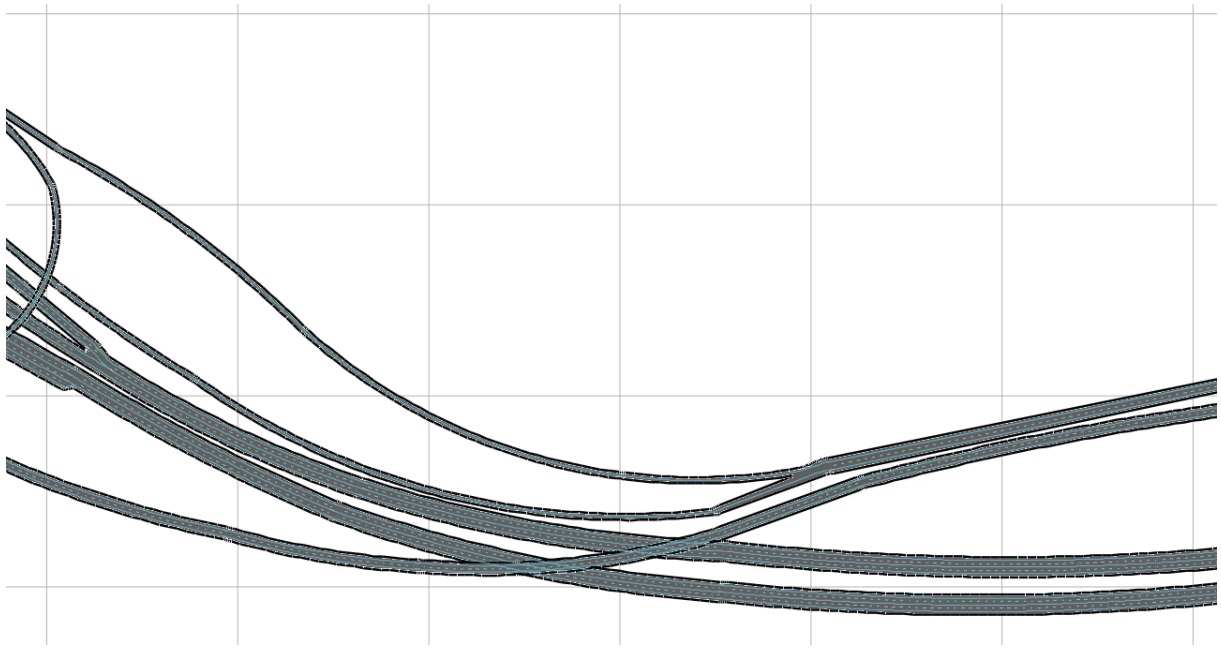
Figuur 119: Ingezoomde weergave van het realistische ontwerp in Paramics deel links



Figuur 120: Ingezoomde weergave van het realistische ontwerp in Paramics deel links-midden



Figuur 121: Ingezoomde weergave van het realistische ontwerp in Paramics deel rechts-midden



Figuur 122: Ingezoomde weergave van het realistische ontwerp in Paramics deel rechts

Bijlage 27: Vergelijking microsimulatie resultaten

In deze bijlage worden de microsimulatie resultaten van de drie ontwerpvarianten (huidig, ideaal en realistisch ontwerp) vergeleken. Op basis van de mogelijkheden van Paramics en SSAM worden de volgende resultaten uit de microsimulatie geanalyseerd:

- Gemiddelde reistijden per route over de Harmsenknoop;
- Reistijdverliesuren per route en de totale som;
- Gemiddelde snelheden per route over de Harmsenknoop;
- Het aantal afgewikkelde voertuigen;
- Het aantal conflicten en de percentuele verdeling per type conflict;
- Locatie van voorspelde conflicten;
- Gemiddelde Time-To-Collision (TTC) waarden;
- Gemiddelde Post-Encroachment Time (PET) waarden;
- Gemiddelde en maximale snelheidsverschillen bij de voorspelde conflicten (DeltaS waarden).

Gemiddelde reistijden

Voor elke ontwerpvariant wordt de gemiddelde reistijd per route over de Harmsenknoop bepaald door eerst per OD-paar de reistijd per simulatie-run te berekenen. Vervolgens wordt het gemiddelde van de tien verschillende runs als gemiddelde reistijd genomen. Daarnaast wordt de standaarddeviatie gegeven om de spreiding van het berekende gemiddelde aan te geven.

De reistijden van personenauto's en vrachtverkeer worden apart bekeken. De personenauto's bestaan uit de voertuigtype Car en Light Goods Vehicles, terwijl het vrachtverkeer bestaat uit Medium en Heavy Light Goods Vehicles. Tabel 56 geeft een overzicht van de gemiddelde reistijden in de ochtendspits per OD-paar voor de drie ontwerpvarianten en Tabel 57 geeft die van de avondspits.

Tabel 56: Overzicht gemiddelde reistijden (ochtendspits) van verschillende ontwerpvarianten volgens resultaten van Paramics

Ochtendspits - Gemiddelde reistijd in seconden							
Verkeersstroom	Voertuig-categorie	Huidige ontwerp		Ideaal ontwerp		Realistische ontwerp	
		Gem	std	Gem	std	gem	std
A15 West → Calandbrug	Personenauto's	87	1,18	81	1,09	81	1,36
	Vrachtverkeer	88	1,97	82	0,57	84	1,39
A15 West → Thomassentunnel	Personenauto's	83	0,39	70	0,18	69	0,27
	Vrachtverkeer	89	0,29	75	0,27	75	0,12
A15 West → N57	Personenauto's	230	31,18	53	0,95	54	0,65
	Vrachtverkeer	305	63,17	73	1,10	61	1,58
Calandbrug → A15 West	Personenauto's	74	1,01	75	0,82	75	0,60
	Vrachtverkeer	79	1,03	77	1,15	79	0,62
Calandbrug → N57	Personenauto's	128	1,07	59	0,47	61	0,51
	Vrachtverkeer	133	0,66	67	0,39	65	0,29
N57 → Calandbrug	Personenauto's	88	0,64	59	2,50	58	0,10
	Vrachtverkeer	96	1,69	60	2,53	61	0,69
N57 → Thomassentunnel	Personenauto's	102	1,77	56	2,36	51	0,15
	Vrachtverkeer	107	2,32	57	2,39	53	0,32
N57 → A15 West	Personenauto's	73	1,74	55	1,29	89	0,47
	Vrachtverkeer	76	1,75	58	1,04	92	0,83
Thomassentunnel → A15 West	Personenauto's	70	0,20	71	0,21	71	0,18
	Vrachtverkeer	75	0,34	77	0,31	77	0,25
Thomassentunnel → N57	Personenauto's	89	0,21	53	0,14	55	0,12
	Vrachtverkeer	92	0,66	72	0,27	68	0,39

Tabel 57: Overzicht gemiddelde reistijden (avondspits) van verschillende ontwerpvarianten volgens resultaten van Paramics

Avondspits - Gemiddelde reistijd [s]							
Verkeersstroom	Voertuig-categorie	Huidige ontwerp		Ideaal ontwerp		Realistische ontwerp	
		Gem	std	Gem	std	gem	std
		A15 West → Calandbrug	Personenauto's	248	86,89	81	1,00
	Vracherverkeer	248	86,67	83	1,40	83	0,72
A15 West → Thomassentunnel	Personenauto's	133	37,33	72	0,19	71	0,19
	Vracherverkeer	137	37,95	76	0,31	75	0,24
A15 West → N57	Personenauto's	1.181	167,09	55	0,29	55	0,25
	Vracherverkeer	1.202	239,74	75	0,82	62	1,40
Calandbrug → A15 West	Personenauto's	74	0,26	75	0,87	75	0,81
	Vracherverkeer	79	0,92	77	0,96	79	0,64
Calandbrug → N57	Personenauto's	137	0,45	60	0,42	62	0,34
	Vracherverkeer	142	0,98	68	0,52	67	0,60
N57 → Calandbrug	Personenauto's	119	6,19	56	0,22	57	0,22
	Vracherverkeer	129	5,37	57	0,34	60	0,52
N57 → Thomassentunnel	Personenauto's	88	0,27	52	0,17	50	0,09
	Vracherverkeer	93	0,67	53	0,30	51	0,36
N57 → A15 West	Personenauto's	58	0,55	52	0,46	87	1,20
	Vracherverkeer	63	0,39	56	0,45	90	1,45
Thomassentunnel → A15 West	Personenauto's	69	0,26	70	0,17	392	18,26
	Vracherverkeer	75	0,26	77	0,20	404	19,47
Thomassentunnel → N57	Personenauto's	93	0,25	59	0,85	582	23,08
	Vracherverkeer	96	1,43	73	0,68	593	46,23

Uit Tabel 56 en Tabel 57 volgt dat de reistijden van de personenauto's en het vracherverkeer weinig verschil bevatten. Dit komt waarschijnlijk doordat de ontwerpsnelheid van de verbindingswegen (50 of 70 km/h) onder de maximale snelheid van het vracherverkeer zit (90 km/h), waardoor de vrachtwagen dezelfde snelheid als personenauto's kunnen rijden. Daarnaast zijn de verticale hellingen in de ontwerpen relatief kort (slechts enkele honderden meters in plaats van kilometers), waardoor de snelheidsterugval van het vracherverkeer laag is.

Reistijdverliesuren

Om de afname van de gemiddelde reistijden kwantitatief uit te drukken, wordt het aantal reistijdverliesuren van elke ontwerpvariant berekend. Dit wordt gedaan door per ontwerp apart te kijken naar de gemiddelde reistijd en vrije reistijd van elke verkeersstroom. De vrije reistijd verwijst hierbij naar de reistijd zonder file en kan worden bepaald door naar de reistijden van de eerste vijf minuten van de simulatie te kijken (Sweco, 2017). Tijdens deze eerste vijf minuten bevinden zich namelijk weinig voertuigen in het model, waardoor kan worden aangenomen dat de bijbehorende reistijden de vrije reistijd representeert.

Door vervolgens het verschil tussen de gemiddelde en vrije reistijd te vermenigvuldigen met het aantal voertuigen op de bijbehorende route (intensiteit), kan het aantal reistijdverliesuren worden bepaald. In Tabel 58 tot en met Tabel 61 wordt de berekening van het aantal rijstijdverliesuren van de drie varianten voor zowel de ochtend- als avondspits berekend. De resultaten worden in paragraaf 11.4 gebruikt om de bijbehorende reistijdwinst te berekenen.

Tabel 58: Gemiddelde en vrije reistijd van de verkeersstromen per variant in de ochtendspits

Ochtendspits		Gemiddelde reistijd [seconden]			Vrije reistijd [seconden]		
Verkeersstroom	Voertuig-categorie	Huidig ontwerp	Ideaal ontwerp	Realistisch ontwerp	Huidig ontwerp	Ideaal ontwerp	Realistisch ontwerp
A15 West → Calandbrug	Auto's	87	81	81	80	80	80
	Vracht	88	82	84	82	82	82
A15 West → Thomassentunnel	Auto's	83	70	69	67	65	65
	Vracht	89	75	75	73	71	71
A15 West → N57	Auto's	230	53	54	69	53	53
	Vracht	305	73	61	71	61	61
Calandbrug → A15 West	Auto's	74	75	75	62	62	62
	Vracht	79	77	79	71	71	71
Calandbrug → N57	Auto's	128	59	61	120	57	60
	Vracht	133	67	65	122	65	64
N57 → Calandbrug	Auto's	88	59	58	73	55	54
	Vracht	96	60	61	78	57	56
N57 → Thomassentunnel	Auto's	102	56	51	78	48	45
	Vracht	107	57	53	84	49	51
N57 → A15 West	Auto's	73	55	89	51	51	89
	Vracht	76	58	92	55	55	90
Thomassentunnel → A15 West	Auto's	70	71	71	69	67	67
	Vracht	75	77	77	73	71	71
Thomassentunnel → N57	Auto's	89	53	55	84	47	55
	Vracht	92	72	68	91	63	65

Tabel 59: Berekening totale reistijdverlies per variant in de ochtendspits

Ochtendspits		Verschil in reistijd [seconden]			Intensiteit [vtg/uur]	Totale reistijdverlies [sec]		
Verkeersstroom	Voertuig-categorie	Huidig ontwerp	Ideaal ontwerp	Realistisch ontwerp		Huidig ontwerp	Ideaal ontwerp	Realistisch ontwerp
A15 West → Calandbrug	Auto's	7	1	1	38	266	38	38
	Vracht	6	0	2	33	198	0	66
A15 West → Thomassentunnel	Auto's	16	5	4	688	11.008	3.440	2.752
	Vracht	16	4	4	422	6.752	1.688	1.688
A15 West → N57	Auto's	161	0	1	22	3.542	0	22
	Vracht	234	12	0	5	1.170	60	0
Calandbrug → A15 West	Auto's	12	13	13	67	804	871	871
	Vracht	8	6	8	36	288	216	288
Calandbrug → N57	Auto's	8	2	1	57	456	114	57
	Vracht	11	2	1	144	1.584	288	144
N57 → Calandbrug	Auto's	15	4	4	564	8.460	2.256	2.256
	Vracht	18	3	5	41	738	123	205
N57 → Thomassentunnel	Auto's	24	8	6	1.571	37.704	12.568	9.426
	Vracht	23	8	2	39	897	312	78
N57 → A15 West	Auto's	22	4	0	147	3.234	588	0
	Vracht	21	3	2	62	1.302	186	124
Thomassentunnel → A15 West	Auto's	1	4	4	1.948	1.948	7.792	7.792
	Vracht	2	6	6	316	632	1.896	1.896
Thomassentunnel → N57	Auto's	5	6	0	1.028	5.140	6.168	0
	Vracht	1	9	3	57	57	513	171
Totale reistijdverlies					Minuten	1.436	652	465
					Uren	24	11	8

Tabel 60: Gemiddelde en vrije reistijd van de verkeersstromen per variant in de avondspits

Avondspits		Gemiddelde reistijd [seconden]			Vrije reistijd [seconden]		
Verkeersstroom	Voertuig-categorie	Huidig ontwerp	Ideaal ontwerp	Realistisch ontwerp	Huidig ontwerp	Ideaal ontwerp	Realistisch ontwerp
A15 West → Calandbrug	Auto's	248	81	82	80	80	80
	Vracht	248	83	83	82	82	82
A15 West → Thomassentunnel	Auto's	133	72	71	67	65	65
	Vracht	137	76	75	73	71	71
A15 West → N57	Auto's	1.181	55	55	69	53	53
	Vracht	1.202	75	62	71	61	61
Calandbrug → A15 West	Auto's	74	75	75	62	62	62
	Vracht	79	77	79	71	71	71
Calandbrug → N57	Auto's	137	60	62	120	57	60
	Vracht	142	68	67	122	65	64
N57 → Calandbrug	Auto's	119	56	57	73	55	54
	Vracht	129	57	60	78	57	56
N57 → Thomassentunnel	Auto's	88	52	50	78	48	45
	Vracht	93	53	51	84	49	51
N57 → A15 West	Auto's	58	52	87	51	51	87
	Vracht	63	56	90	55	55	90
Thomassentunnel → A15 West	Auto's	69	70	392	69	67	67
	Vracht	75	77	404	73	71	71
Thomassentunnel → N57	Auto's	93	59	582	84	47	55
	Vracht	96	73	593	91	63	65

Tabel 61: Berekening totale reistijdverlies per variant in de avondspits

Ochtendspits		Verschil in reistijd [seconden]			Intensiteit [vtg/uur]	Totale reistijdverlies [sec]		
Verkeersstroom	Voertuig-categorie	Huidig ontwerp	Ideaal ontwerp	Realistisch ontwerp		Huidig ontwerp	Ideaal ontwerp	Realistisch ontwerp
A15 West → Calandbrug	Auto's	168	1	2	98	6.384	38	76
	Vracht	166	1	1	52	5.478	33	33
A15 West → Thomassentunnel	Auto's	66	7	6	1.557	45.408	4.816	4.128
	Vracht	64	5	4	643	27.008	2.110	1.688
A15 West → N57	Auto's	1.112	2	2	175	24.464	44	44
	Vracht	1.131	14	1	11	5.655	70	5
Calandbrug → A15 West	Auto's	12	13	13	95	804	871	871
	Vracht	8	6	8	51	288	216	288
Calandbrug → N57	Auto's	17	3	2	378	969	171	114
	Vracht	20	3	3	126	2.880	432	432
N57 → Calandbrug	Auto's	46	1	3	297	25.944	564	1.692
	Vracht	51	0	4	88	2.091	0	164
N57 → Thomassentunnel	Auto's	10	4	5	584	15.710	6.284	7.855
	Vracht	9	4	0	67	351	156	0
N57 → A15 West	Auto's	7	1	0	34	1.029	147	0
	Vracht	8	1	0	35	496	62	0
Thomassentunnel → A15 West	Auto's	0	3	325	595	0	5.844	633.100
	Vracht	2	6	333	433	632	1.896	105.228
Thomassentunnel → N57	Auto's	9	12	527	2.137	9.252	12.336	541.756
	Vracht	5	10	528	59	285	570	30.096
Totale reistijdverlies					Minuten	2.919	611	22.126
					Uren	49	10	369

Gemiddelde snelheden

Voor elke ontwerpvariant wordt de gemiddelde snelheid per route over de Harmsenknoop bepaald door eerst per OD-paar de reistijd per simulatie-run te berekenen. Vervolgens wordt het gemiddelde van de tien verschillende runs als gemiddelde snelheid genomen. Daarnaast wordt de standaarddeviatie gegeven om de spreiding van het berekende gemiddelde aan te geven.

De snelheden van personenauto's en vrachtverkeer worden apart bekeken. De personenauto's bestaan uit de voertuigtype Car en Light Goods Vehicles, terwijl het vrachtverkeer bestaat uit Medium en Heavy Goods Vehicles. Tabel 62 geeft een overzicht van de gemiddelde snelheden in de ochtendspits per OD-paar voor de drie ontwerpvarianten en Tabel 63 geeft een overzicht van de gemiddelde snelheden in de avondspits.

Daarnaast zijn in Figuur 123 en Figuur 124 de gemiddelde snelheden van alle voertuigen (personenauto's en vrachtverkeer samen) in een grafiek weergegeven.

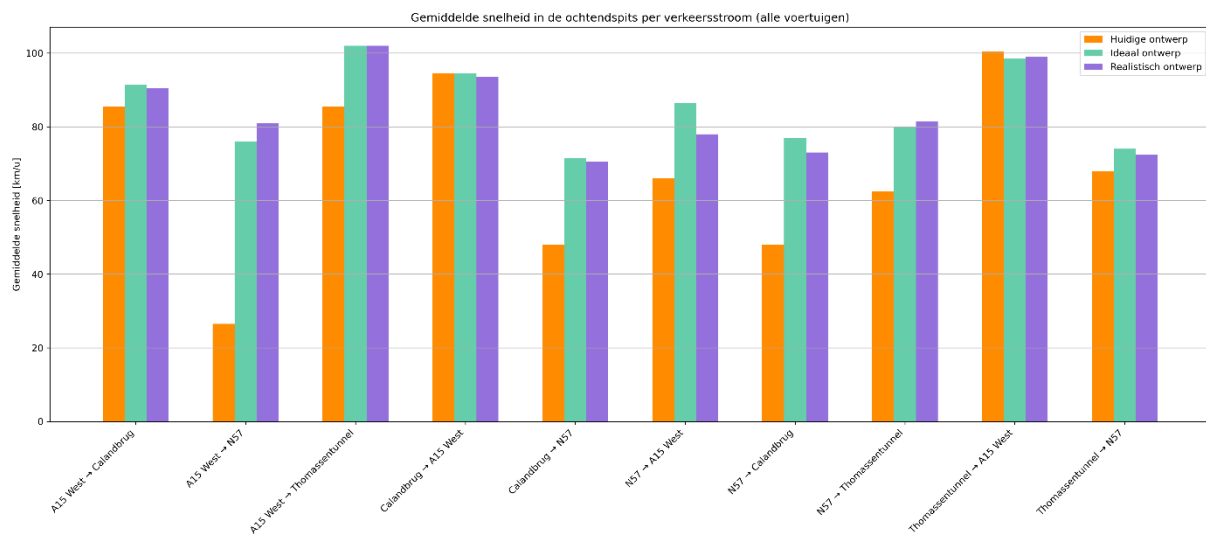
Tabel 62: Overzicht gemiddelde snelheden (ochtendspits) van verschillende ontwerpvarianten volgens resultaten van Paramics

Ochtendspits - Gemiddelde snelheid [s]							
Verkeersstroom	Voertuig-categorie	Huidige ontwerp		Ideaal ontwerp		Realistische ontwerp	
		Gem	std	Gem	std	gem	std
A15 West → Calandbrug	Personenauto's	86	1,12	92	1,27	92	1,57
	Vrachtverkeer	85	1,75	91	0,70	89	1,38
A15 West → Thomassentunnel	Personenauto's	88	0,40	106	0,28	106	0,40
	Vrachtverkeer	83	0,24	98	0,34	98	0,15
A15 West → N57	Personenauto's	30	2,72	88	1,37	86	1,00
	Vrachtverkeer	23	5,02	64	0,88	76	1,87
Calandbrug → A15 West	Personenauto's	97	1,26	96	1,03	96	0,79
	Vrachtverkeer	92	1,15	93	1,31	91	0,66
Calandbrug → N57	Personenauto's	49	0,39	76	0,72	73	0,57
	Vrachtverkeer	47	0,23	67	0,40	68	0,30
N57 → Calandbrug	Personenauto's	50	0,29	78	2,39	75	0,13
	Vrachtverkeer	46	0,72	76	2,19	71	0,79
N57 → Thomassentunnel	Personenauto's	64	0,95	81	2,45	83	0,23
	Vrachtverkeer	61	1,20	79	2,54	80	0,50
N57 → A15 West	Personenauto's	68	1,43	89	1,61	79	0,40
	Vrachtverkeer	64	1,18	84	1,15	77	0,71
Thomassentunnel → A15 West	Personenauto's	104	0,28	103	0,29	103	0,27
	Vrachtverkeer	97	0,42	94	0,35	95	0,31
Thomassentunnel → N57	Personenauto's	69	0,16	85	0,21	80	0,16
	Vrachtverkeer	67	0,47	63	0,25	65	0,36

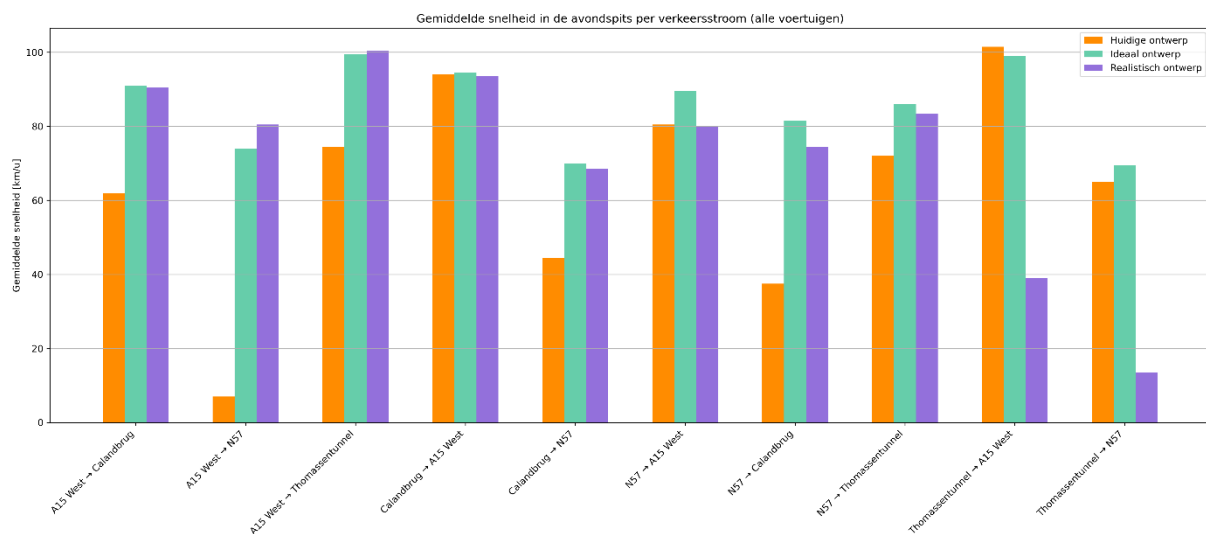
Tabel 63: Overzicht gemiddelde snelheden (avondspits) van verschillende ontwerpvarianten volgens resultaten van Paramics

Avondspits - Gemiddelde snelheid [s]							
Verkeersstroom	Voertuig-categorie	Huidige ontwerp		Ideaal ontwerp		Realistische ontwerp	
		Gem	std	Gem	std	gem	std
A15 West → Calandbrug	Personenauto's	63	7,77	92	1,08	91	0,80
	Vrachtverkeer	61	8,08	90	1,43	90	0,75
A15 West → Thomassentunnel	Personenauto's	76	5,81	102	0,27	103	0,26
	Vrachtverkeer	73	5,68	97	0,37	98	0,29
A15 West → N57	Personenauto's	8	1,36	85	0,45	85	0,36
	Vrachtverkeer	6	1,65	63	0,68	76	1,65

<i>Calandbrug → A15 West</i>	Personenauto's	97	0,34	96	1,09	96	1,03
	Vrachtwagen	91	1,05	93	1,17	91	0,75
<i>Calandbrug → N57</i>	Personenauto's	45	0,13	74	0,53	71	0,36
	Vrachtwagen	44	0,29	66	0,53	66	0,57
<i>N57 → Calandbrug</i>	Personenauto's	39	1,78	82	0,33	76	0,27
	Vrachtwagen	36	1,32	81	0,46	73	0,59
<i>N57 → Thomassentunnel</i>	Personenauto's	74	0,23	87	0,29	85	0,16
	Vrachtwagen	70	0,49	85	0,48	82	0,56
<i>N57 → A15 West</i>	Personenauto's	83	0,80	93	0,86	81	1,03
	Vrachtwagen	78	0,44	86	0,61	79	1,13
<i>Thomassentunnel → A15 West</i>	Personenauto's	106	0,42	104	0,25	41	1,69
	Vrachtwagen	97	0,32	94	0,23	37	1,79
<i>Thomassentunnel → N57</i>	Personenauto's	66	0,17	77	0,83	14	1,30
	Vrachtwagen	64	0,94	62	0,54	13	1,78



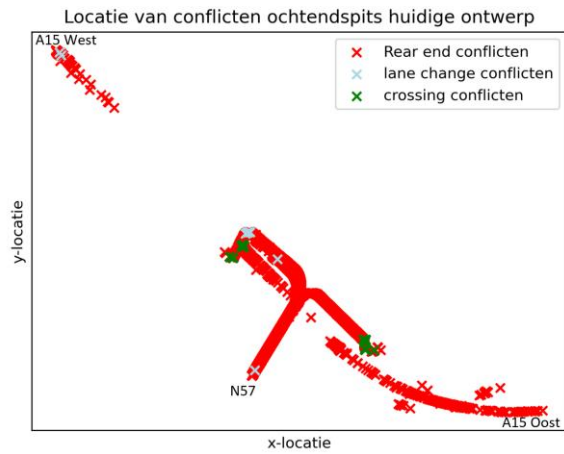
Figuur 123: Gemiddelde snelheid in kilometer per uur in de ochtendspits per verkeersstroom van de drie ontwerpvarianten



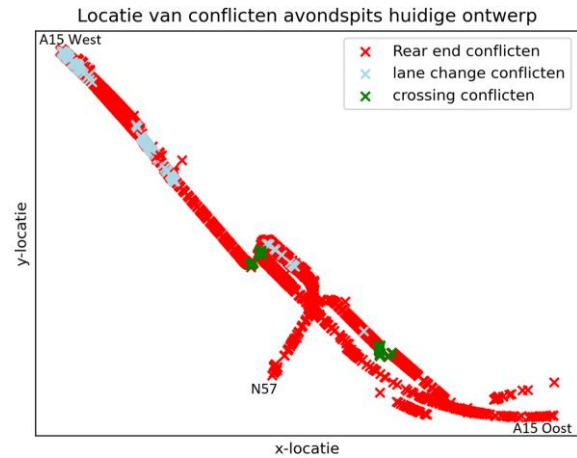
Figuur 124: Gemiddelde snelheid in kilometer per uur in de avondspits per verkeersstroom van de drie ontwerpvarianten

Locatie van conflicten SSAM

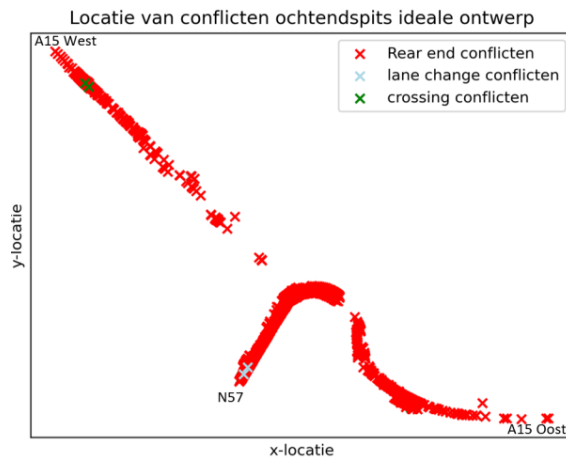
In de figuren hieronder worden de locaties van de verwachte conflicten weergegeven voor de drie ontwerpvarianten (huidig, ideaal en realistisch ontwerp), zowel voor de ochtend- als avondspits.



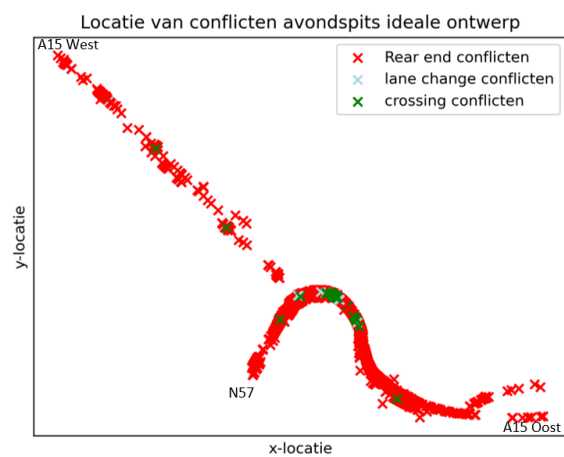
Figuur 125: Locatie van conflicten uit SSAM: ochtendspits huidige ontwerp met toekomstige intensiteiten



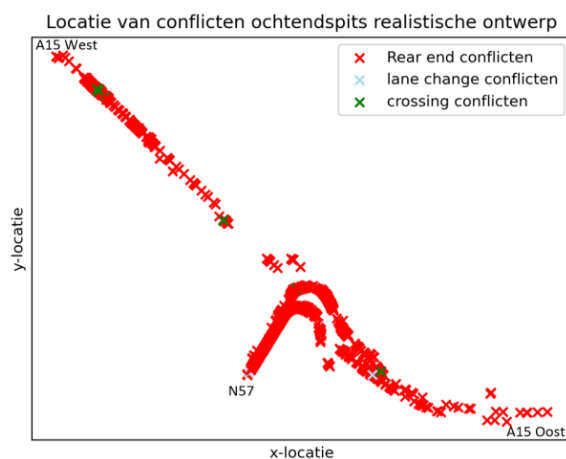
Figuur 126: Locatie van conflicten uit SSAM: avondspits huidige ontwerp met toekomstige intensiteiten



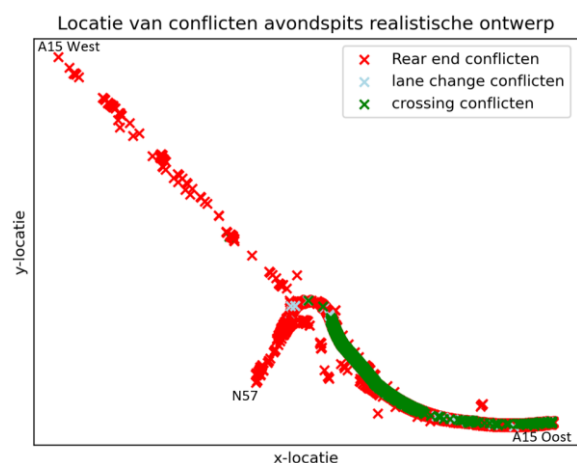
Figuur 127: Locatie van conflicten uit SSAM: ochtendspits ideale ontwerp met toekomstige intensiteiten



Figuur 128: Locatie van conflicten uit SSAM: avondspits ideale ontwerp met toekomstige intensiteiten



Figuur 129: Locatie van conflicten uit SSAM: ochtendspits realistische ontwerp met toekomstige intensiteiten

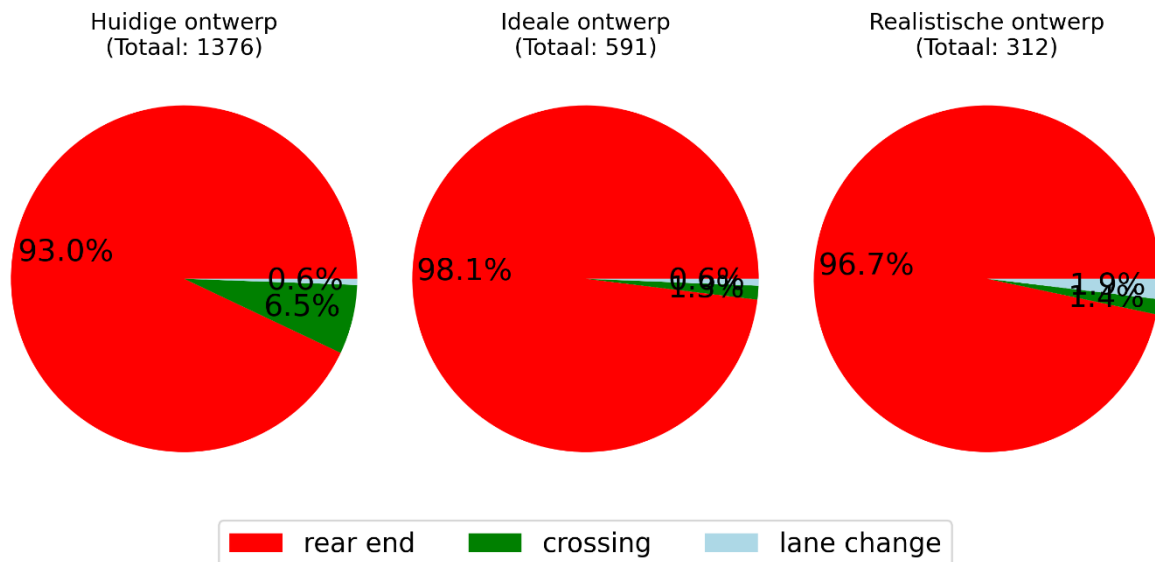


Figuur 130: Locatie van conflicten uit SSAM: avondspits realistische ontwerp met toekomstige intensiteiten

Aantal conflicten en verdeling conflict typen

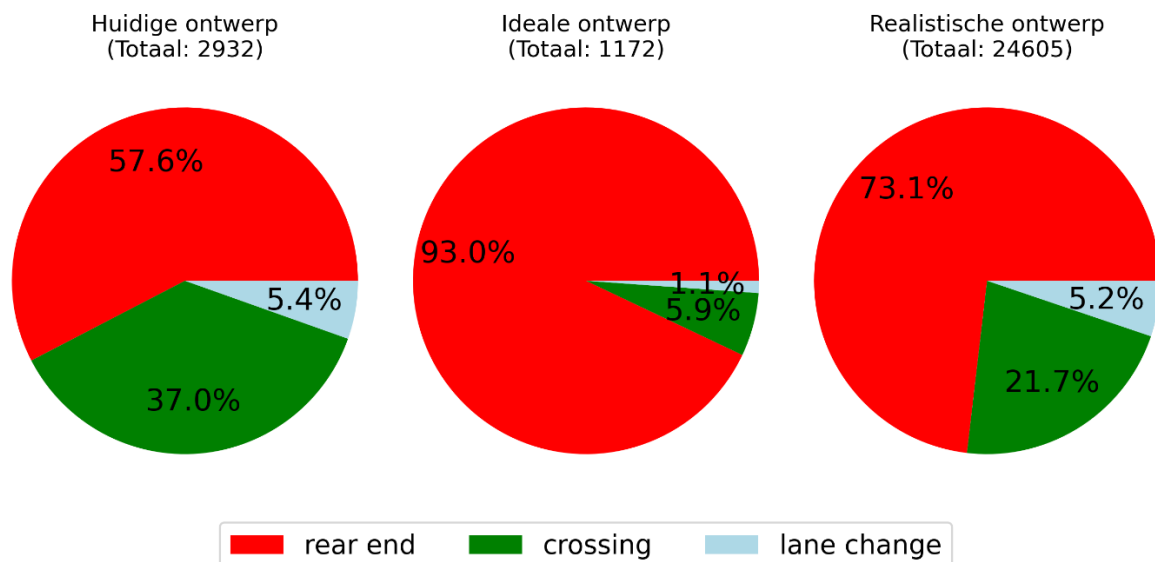
In de figuren hieronder worden de locaties van de verwachte conflicten weergegeven voor de drie ontwerpvarianten, zowel voor de ochtend- als avondspits.

Verdeling conflict types in de ochtendspits



Figuur 131: Drie cirkeldiagrammen voor de verdeling van de conflict types in de ochtendspits per variant

Verdeling conflict types in de avondspits



Figuur 132: Drie cirkeldiagrammen voor de verdeling van de conflict types in de avondspits per variant

TTC, PET en DeltaS

SSAM is in staat om de veiligheid van de drie varianten uit te drukken in de volgende waarden:

- Time to Collision (TTC) (= tijd tot botsing) staat voor de minimale tijd tot een botsing tussen twee voertuigen, als ze doorgaan met hun huidige snelheid en richting. Hoe lager de TTC, hoe gevaarlijker de situatie. SSAM gebruikt drempelwaarde $TTC < 1,5$ om conflicten te definiëren.
- Post-Encroachment Time (PET) (= tijd na inbreuk) is de tijd die verstrijkt tussen het verlaten van een kritieke ruimte door één voertuig en het betreden van deze ruimte door een ander voertuig. Hierbij wijst een kleinere waarde voor PET op een grotere kans op een conflict.
- Snelheidsverschil (DeltaS) is het verschil in snelheid tussen twee voertuigen in een conflict. De kans op ernstige gevolgen is groter, als het snelheidsverschil groter is.

De gemiddelde waarden voor TTC, PET en DeltaS worden bepaald door het gemiddelde te nemen van de tien simulatie-runs. Daarbij wordt voor elke ontwerpvariant afzonderlijk gekeken naar de ochtend- en avondspits. In onderstaande tabellen worden de waarden van TTC, PET en DeltaS uitgesplitst naar de drie conflicttypes en daarnaast wordt de gemiddelde waarden weergegeven.

Tabel 64: Overzicht van de TTC-waarden per ontwerp variant in zowel de ochtend- als avondspits

Ontwerpvariant	Spitsperiode	Gemiddelde TTC [s]	TTC rear end [s]	TTC lane change [s]	TTC crossing [s]
Huidige ontwerp	Ochtendspits	0,796	0,784	0,599	0,993
	Avondspits	0,554	0,814	0,094	0,216
Ideale ontwerp	Ochtendspits	0,422	0,427	0,085	0,180
	Avondspits	0,462	0,487	0,190	0,100
Realistische ontwerp	Ochtendspits	0,567	0,578	0,419	0,179
	Avondspits	0,519	0,644	0,230	0,166

Tabel 65: Overzicht van de PET-waarden per ontwerp variant in zowel de ochtend- als avondspits

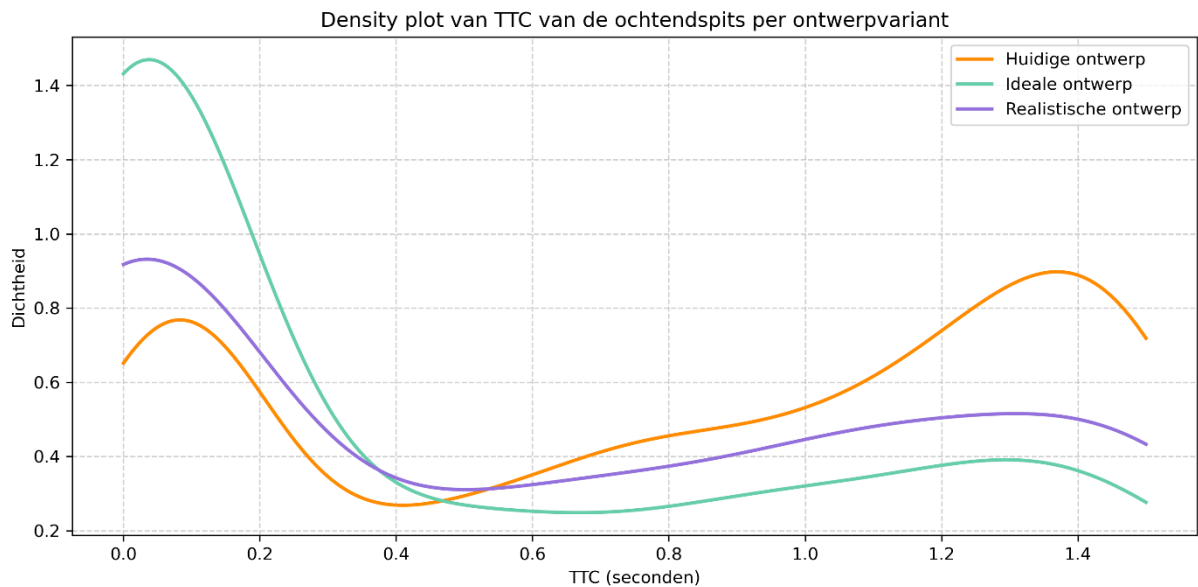
Ontwerpvariant	Spitsperiode	Gemiddelde PET [s]	PET rear end [s]	PET lane change [s]	PET crossing [s]
Huidige ontwerp	Ochtendspits	0,902	0,864	0,586	1,478
	Avondspits	0,746	1,082	0,146	0,310
Ideale ontwerp	Ochtendspits	0,477	0,477	0,179	0,524
	Avondspits	0,507	0,537	0,274	0,080
Realistische ontwerp	Ochtendspits	0,434	0,439	0,399	0,305
	Avondspits	0,766	0,968	0,297	0,195

Tabel 66: Overzicht van de DeltaS-waarden per ontwerp variant in zowel de ochtend- als avondspits

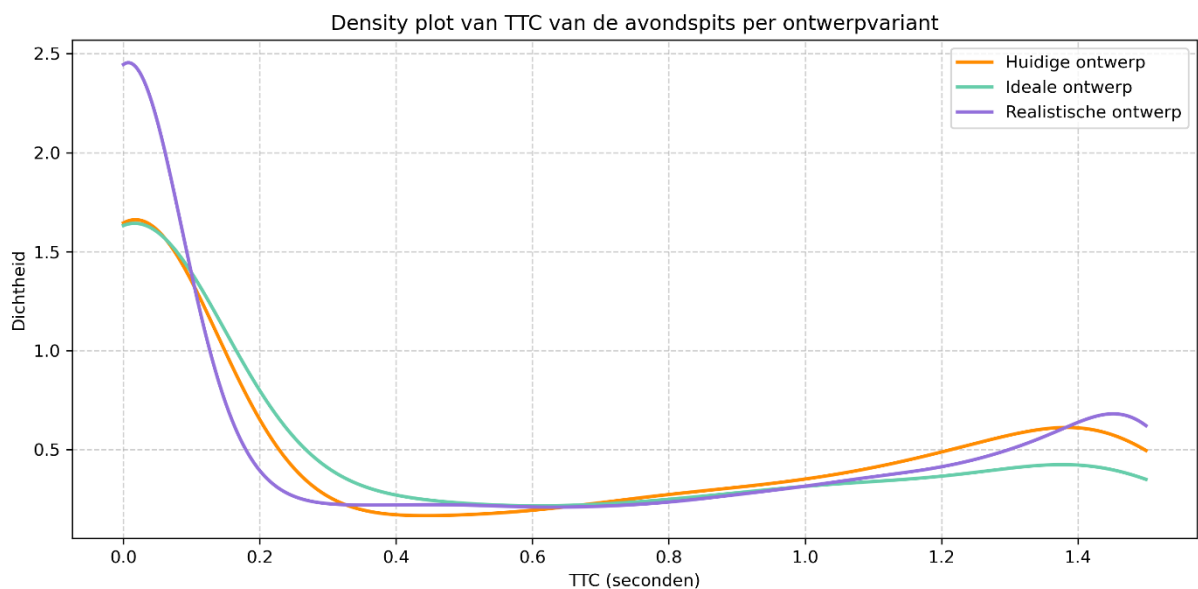
Ontwerpvariant	Spitsperiode	Gemiddelde DeltaS [km/h]	Maximale DeltaS [km/h]	DeltaS rear end [km/h]	DeltaS lane change [km/h]	DeltaS crossing [km/h]
Huidige ontwerp	Ochtendspits	4,975	53,130	4,885	12,666	5,568
	Avondspits	6,388	32,130	3,983	6,532	10,115
Ideale ontwerp	Ochtendspits	4,966	66,400	4,740	15,222	22,045
	Avondspits	6,002	63,680	5,541	9,508	13,023
Realistische ontwerp	Ochtendspits	6,795	64,960	6,339	11,101	33,539
	Avondspits	3,542	62,990	3,039	4,365	5,045

Bijlage 28: Dichtheidsgrafieken van de TTC-waardes

In deze bijlage worden de dichtheidsgrafieken van de TTC-waardes van de drie varianten weergegeven. Figuur 133 geeft de grafieken van de ochtendspits weer en in Figuur 134 worden de grafieken van de avondspits weergegeven.



Figuur 133: Dichtheidsgrafiek van de verdeling van de TTC-waarde in de ochtendspits voor de drie varianten

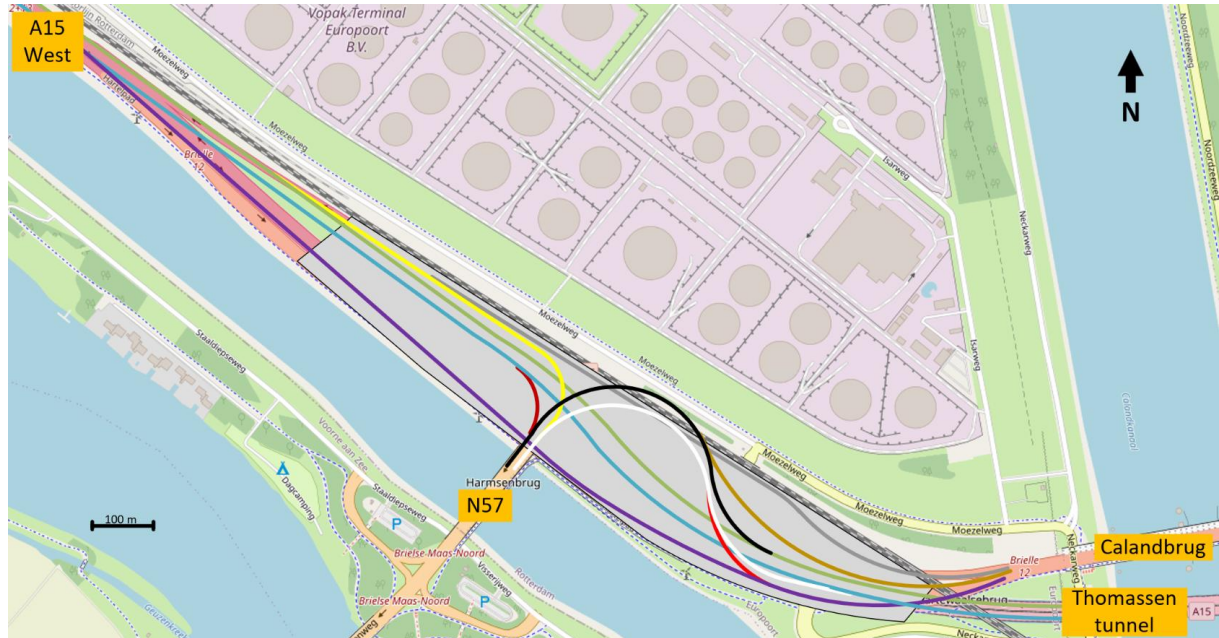


Figuur 134: Dichtheidsgrafiek van de verdeling van de TTC-waarde in de avondspits voor de drie varianten

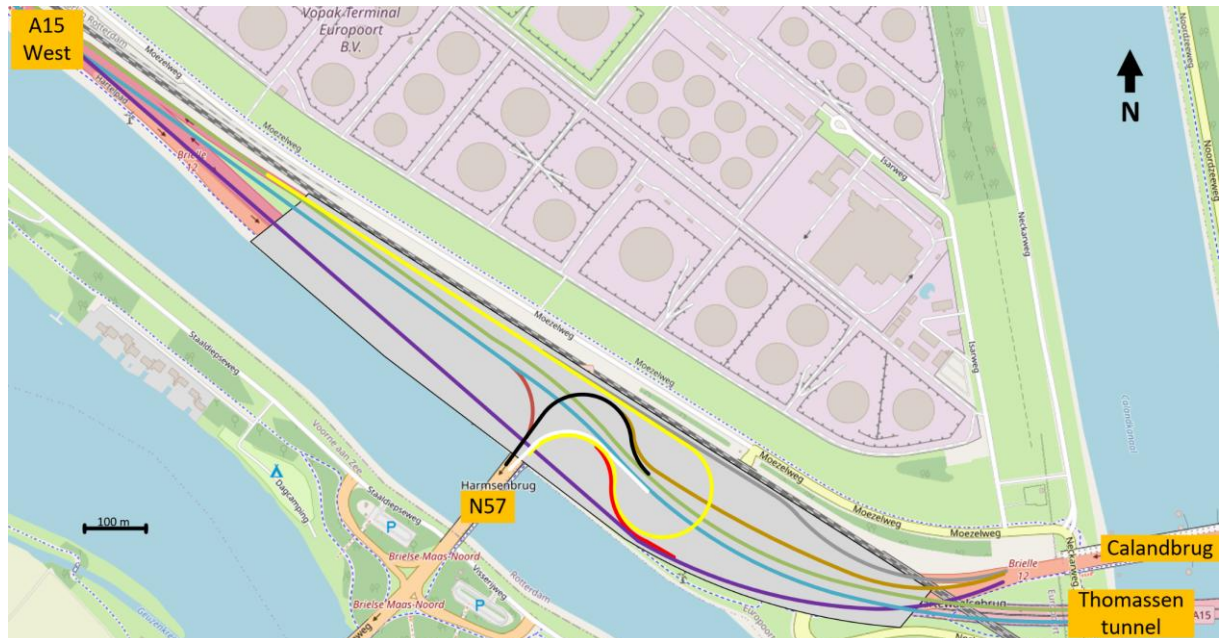
Bijlage 29: Vergelijking ontwerpvarianten

In deze bijlage worden de belangrijkste ontwerpaspecten van het ideale en realistische ontwerp overzichtelijk onder elkaar weergegeven. De onderstaande figuren en tabellen tonen voor beide varianten de viltstiftenschets, de belangrijkste ontwerpparameters en de ligging van ongelijkvloerse kruisingen, zodat een directe vergelijking mogelijk is.

Viltstiftenschetsen



Figuur 135: Viltstiftenschets ideale ontwerpvariant met verschillende kleuren voor de tien verkeersstromen



Figuur 136: Viltstiftenschets realistische ontwerpvariant met verschillende kleuren voor de tien verkeersstromen

Ontwerpparameters

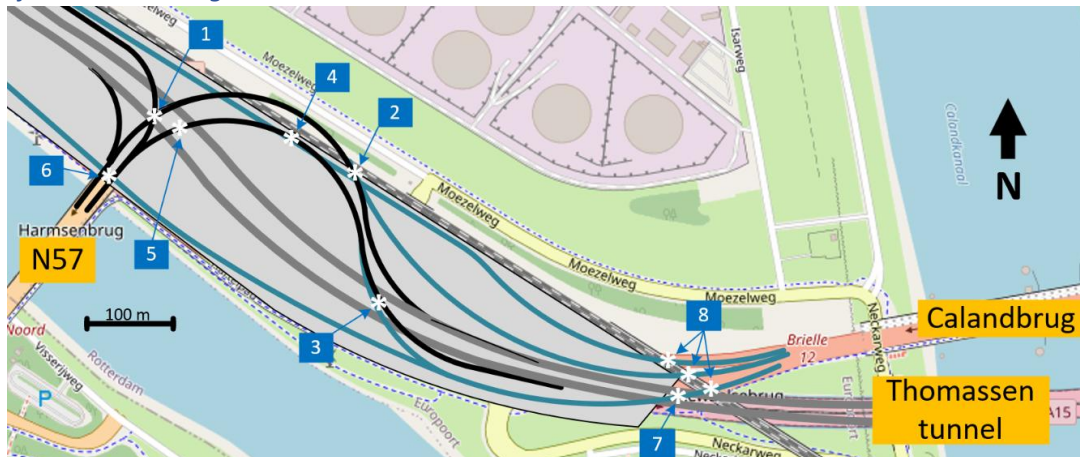
Tabel 67: Ideale ontwerp: overzicht van de ontwerpparameters en de gekozen boogstraal (ROA, 2019)

Verkeersstroom	Kleur	Ontwerpsnelheid	Verkanting	Boogstraal
A15 West → Calandbrug	Paars	90 km/h	2,5 %	675 m
A15 West → Thomassentunnel	Lichtblauw	120 km/h	5%	750 m
A15 West → N57	Roodbruin	50 km/h	6,5%	80 m
Calandbrug → A15 West	Grijs	90 km/h	6%	330 m
Calandbrug → N57	Goud	70 km/h	2,5%	400 m
N57 → Calandbrug	Rood	70 km/h	7%	160 m
N57 → Thomassentunnel	Wit	70 km/h	7%	160 m
N57 → A15 West	Geel	50 km/h	6,5%	80 m
Thomassentunnel → A15 West	Lichtgroen	120 km/h	5%	750 m
Thomassentunnel → N57	Zwart	70 km/h	7%	160 m

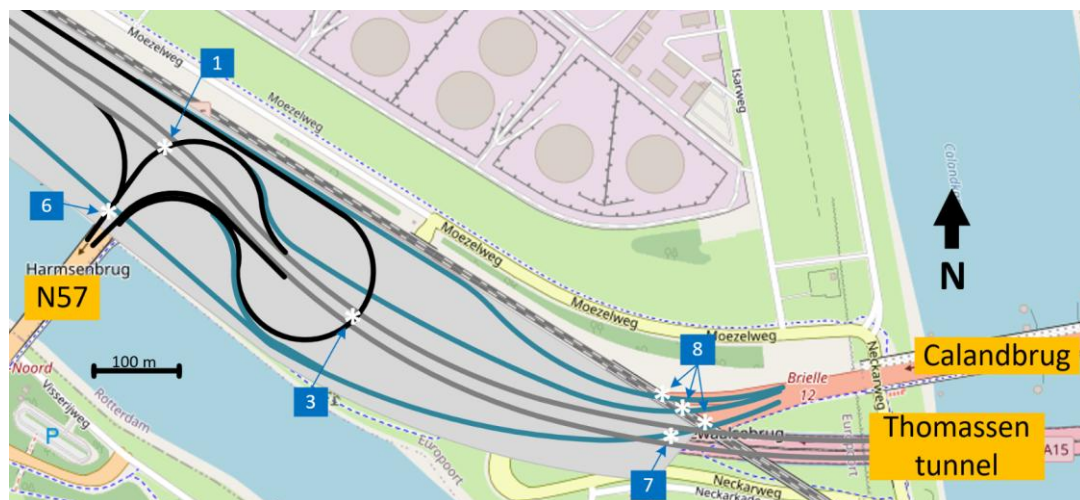
Tabel 68: Realistische ontwerp: overzicht van de ontwerpparameters en de gekozen boogstraal (ROA, 2019)

Verkeersstroom	Kleur	Ontwerpsnelheid	Verkanting	Boogstraal
A15 West → Calandbrug	Paars	90 km/h	2,5 %	675 m
A15 West → Thomassentunnel	Lichtblauw	120 km/h	5%	750 m
A15 West → N57	Roodbruin	50 km/h	6,5%	80 m
Calandbrug → A15 West	Grijs	90 km/h	6%	330 m
Calandbrug → N57	Goud	50 km/h	2,5%	400 m
N57 → Calandbrug	Rood	50 km/h	6,5%	80 m
N57 → Thomassentunnel	Wit	50 km/h	6,5%	80 m
N57 → A15 West	Geel	50 km/h	6,5%	80 m
Thomassentunnel → A15 West	Lichtgroen	120 km/h	5%	750 m
Thomassentunnel → N57	Zwart	50 km/h	6,5%	80 m

Ongelijkvloerse kruisingen



Figuur 137: Overzicht ligging van de ongelijkvloerse kruisingen van het ideale ontwerp



Figuur 138: Overzicht ligging van de ongelijkvloerse kruisingen van het realistische ontwerp