TrafficQuest
CENTRE FOR EXPERTISE ON TRAFFIC MANAGEMENT

TrafficQuest rapport

De potentiële meerwaarde van samenwerking in routegeleiding

Verkennend onderzoek ten behoeve van het beperken van hinder bij werkzaamheden

Colofon

Auteurs	Oskar Eikenbroek (Universiteit Twente) Eric van Berkum (Universiteit Twente) Luc Wismans (Universiteit Twente)
Datum	11 december 2025
Versie nummer	1.0
Uitgegeven door	TrafficQuest Postbus 2232 3500 GE UTRECHT
Informatie	Henk Taale
Telefoon	+31 88 798 24 98
Foto voorkant	Jeroen van den Heuvel

TrafficQuest is was een samenwerkingsverband van

TNO innovation for life TU Delft Rijkswaterstaat Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

Verkennend Onderzoek naar de Potentiële Meerwaarde van Publiek-Private Samenwerking bij het Beperken van Hinder in het Kader van de Vervanging- en Renovatieopgave

Eindrapport

Oskar Eikenbroek*, Eric van Berkum, Luc Wismans
Transport Studies, Universiteit Twente

December 2025

*o.a.l.eikenbroek@utwente.nl

Management Summary

Nederland staat voor een omvangrijke Vervanging- en Renovatieopgave (VenR-opgave) in de infrastructuur. De hieraan gekoppelde werkzaamheden leiden onvermijdelijk tot verkeershinder. Wegbeheerders proberen hinder zo veel mogelijk te voorkomen dan wel te beperken door de inzet van verkeersmanagement services. De effectiviteit van deze maatregelen, en daarmee de hinder, wordt echter in grote mate bepaald door het gedrag van weggebruikers. En dit gedrag wordt ook weer beïnvloed door private partijen die zich bezig houden met verkeersmanagement, zoals navigatie serviceproviders. Een gebrek aan samenwerking door de verschillende partijen in de inzet van diensten en maatregelen kan de effectiviteit van verkeersmanagement beperken, met name tijdens niet-reguliere situaties. Dit komt onder meer doordat doelstellingen van partijen niet altijd dezelfde zijn, kwaliteit en compleetheid van verkeersinformatie kunnen verschillen, en doordat er veelal reactief in plaats van pro-actief wordt gehandeld. Het doel van dit onderzoek is om inzichtelijk te maken en te kwantificeren wat de meerwaarde is van proactieve en samenhangende inzet van verkeersmanagementdiensten door publieke en private partijen in het kader van de VenR-opgave.

Door gebruik te maken van dynamisch verkeersmodel MARPLE zijn scenario's geanalyseerd waarbij de effecten van verschillende samenwerkingsmodellen op de verkeerssituatie bij werk in uitvoering zijn gesimuleerd. Per scenario is gevarieerd in de samenwerkingsvorm, de coördinatie van services en of er pro-actief of reactief wordt gehandeld. Hiermee is inzicht verkregen welke effecten publiek-private samenwerking heeft op de verkeersafwikkeling op netwerkniveau, op de reistijd van weggebruikers, en op de verdeling van effecten tussen partijen.

De interactie tussen verschillende partijen is gevat aan de hand van een aanpak uit de speltheorie. Hierbij is uitgegaan van vier partijen die verkeersmanagementservices aanbieden: een nationale wegbeheerder, een lokale wegbeheerder en twee navigatie serviceproviders. Waar wegbeheerders als doel hebben om de total time spent (TTS) op 'hun' deel van het netwerk te minimaliseren, beogen navigatie serviceproviders de snelste route te adviseren aan hun gebruikers.

Een reeks samenwerkingsscenario's is gedefinieerd. In het *do-nothing* scenario is aangenomen dat partijen geen bijzondere acties ondernemen naar aanleiding van wegwerkzaamheden. Uitgangspunt bij het *business-as-usual* scenario is dat serviceproviders en wegbeheerders maatregelen reactief inzetten om hun eigen doelfunctie te optimaliseren. Hierbij wordt geen rekening gehouden met de informatiebeschikbaarheid en het handelen van andere partijen. Wanneer partijen geïsoleerd maar pro-actief handelen wordt geanticipeerd op het effect van het eigen handelen op de verkeerssituatie. In het zgn. *Nash* scenario handelen partijen pro-actief maar niet-coöperatief: wegbeheerders en service providers hebben kennis van de strategieën en doelfuncties van andere partijen. Een stabiele uitkomst van het bijbehorende spel is een Nash-evenwicht waarbij spelers hun doelfunctie niet kunnen verbeteren door eenzijdig van strategie te veranderen. Coalities van verschillende partijen zijn gevormd, waarbij binnen een coalitie services gezamenlijk en pro-actief worden ingezet om een gedeeld doel te bereiken, en tussen coalities niet-coöperatief wordt gehandeld.

In de MARPLE simulaties is uitgegaan van een verkeersnetwerk gestileerd naar de situatie in en rond Almelo. Een capaciteitsbeperking op het hoofdwegennet als gevolg van langdurige wegwerkzaamheden is gemodelleerd. Rijkswaterstaat is de wegbeheerder van het hoofdwegennet en informeert weggebruikers door middel van een DRIP, en de gemeente beheert het onderliggend wegennet en kan op geregelde kruispunten groentijden van signaalgroepen instellen. Voor wat betreft weggebruikers is verondersteld dat een deel de informatie van de DRIP gebruikt in hun routekeuze. De overige weggebruikers krijgen elk een route geadviseerd door een navigatie serviceprovider.

Uit de simulaties op basis van de Almelo casus blijkt dat een pro-actieve inzet van maatregelen al voor veel partijen voordeel kan opleveren in vergelijking met reactief handelen. Pro-actief handelen betekent rekening houden met de invloed van eigen handelen op de toekomstige verkeerssituatie, en rekening houden met het feit dat ook andere partijen zich actief bezighouden met verkeersmanagement en daarmee invloed hebben op de toekomstige verkeerssituatie. Een vergelijking van het *geïsoleerde* scenario (waar er rekening wordt gehouden met de invloed van eigen handelen) met het *do-nothing* en *business-as-usual* scenario geeft aan dat bijvoorbeeld navigatie serviceproviders hiermee een route kunnen adviseren waarbij de gerealiseerde reistijd niet sterk afwijkt van de snelste route.

De simulaties laten zien dat publiek-private samenwerking kan leiden tot een substantiële verbetering van netwerk performance. Dit vraagt soms wel een offer van navigatiegebruikers, die dan een niet-snelste route zouden moeten volgen. Ook de samenwerking tussen de verschillende wegbeheerders om de TTS op het hele netwerk te minimaliseren, is niet altijd gunstig voor alle individuele partijen. De netwerk performance als gevolg van een capaciteitsbeperking op het hoofdwegennet kan worden verbeterd door een deel van het verkeer naar het onderliggend wegennet te sturen, wat dan wel ten koste gaat van de TTS op dit deel van het netwerk.

Verder, in de beschouwde casus profiteert juist de niet-samenwerkende serviceprovider het meest van publiek-private samenwerking. Dat wil zeggen: een serviceprovider kan door te gaan samenwerken slechter af zijn dan de niet-samenwerkende concurrent. De resultaten op basis van de simulaties laten zien dat in dit geval samenwerking alleen opportuun is als alle navigatie serviceproviders dit doen of als er voor het 'verlies' wordt gecompenseerd.

Resumerend kan worden geconcludeerd dat samenwerking goed is voor het systeem, maar dat dit niet per se inhoudt dat alle individuele partijen die de samenwerking zijn aangegaan er beter van worden. Een vervolgonderzoek zou zich kunnen richten op het bepalen van voorwaarden waarbij partijen bereid zijn om samen te werken. Een mogelijkheid om toch een samenwerkingsmodel te realiseren is aan de hand van compensatie of waarde uitwisseling tussen partijen, of door middel van een bepaalde mate van (externe) sturing. In het vervolgonderzoek zouden concepten van speltheorie kunnen worden gebruikt om juist dit nader vorm te geven.

Inhoudsopgave

1 Inleiding **1**
1.1 Probleemstelling . . . 1
1.2 Onderzoeksvragen . . . 1
1.3 Leeswijzer . . . 1

2 Methodologische Opzet **3**
2.1 Modellering . . . 3
2.2 Speltheoretisch raamwerk . . . 4

3 Gebruikerstypen **7**

4 Spellen **9**

5 Scenario's en beoordelingskader **14**
5.1 Netwerk, verkeersvraag en services . . . 14
5.2 Beoordelingskader . . . 15
5.3 Scenario's . . . 16

6 Resultaten **17**
6.1 Gevoeligheidsanalyse . . . 23

7 Synthese **24**
7.1 Bevindingen . . . 24
7.2 Discussie . . . 25
7.3 Suggesties voor vervolgonderzoek . . . 26

1 Inleiding

Aanleiding

De komende jaren staat Nederland voor een omvangrijke vervanging- en renovatieopgave (VenR-opgave). Deze werkzaamheden, zoals geïllustreerd door de casus A27 bij Nieuwegein, kunnen substantiële verkeershinder veroorzaken.

Wegbeheerders trachten hinder waar mogelijk te beperken door de inzet van verkeersmanagement-maatregelen, maar de effectiviteit daarvan is mede afhankelijk van het gedrag van weggebruikers. Dat gedrag wordt, naast de maatregelen van wegbeheerders, ook in grote mate beïnvloed door private serviceproviders (o.a. Google, Flitsmeister, TomTom) die mobiliteits- en navigatie-diensten aanbieden.

De verwachting is dat een nauwere samenwerking tussen publieke wegbeheerders en private dienstverleners, d.w.z. publiek private samenwerking (PPS), kan leiden tot een betere afstemming van maatregelen en adviezen, waardoor hinder wordt verminderd. De grootste kansen hiervoor liggen bij niet-reguliere situaties, zoals werkzaamheden of incidenten, waarin onzekerheid over de verkeerssituatie het grootst is.

Doel

Het doel van dit onderzoek is om inzichtelijk te maken en te kwantificeren wat de meerwaarde is van proactieve en samenhangende inzet van verkeersmanagementdiensten door publieke en private partijen in het kader van de VenR-opgave.

1.1 Probleemstelling

Effectiviteit van verkeersmanagement tijdens niet-reguliere situaties is vaak beperkt door het gebrek aan samenhang in de inzet van diensten en maatregelen van verschillende partijen. Dit komt onder meer voort uit verschillen in:

- doelstellingen tussen partijen;
- kwaliteit en compleetheid van verkeersinformatie;
- reactieve in plaats van anticiperende besluitvorming;
- beperkte samenwerking en informatie-uitwisseling;
- uniform en niet-gedifferentieerd advies aan weggebruikers.

De veronderstelling is dus dat verkeersmanagement met name een meerwaarde heeft bij niet-reguliere situaties, maar dat de effectiviteit wordt beperkt door de niet-gesynchroniseerde inzet van publieke en private services, die zijn gebaseerd op een beperkt en gefragmenteerd beeld van de verkeerssituatie. In dit onderzoek wordt deze veronderstelling getoetst in de context van de VenR-opgave, waarbij door werkzaamheden verkeersmanagementdiensten worden ingezet.

1.2 Onderzoeksvragen

De veronderstelling wordt getoetst aan de hand van een aantal onderzoeksvragen opgesteld. Deze zijn als volgt:

1. Wat is de meerwaarde van het afstemmen van services van verschillende partijen?
2. Wat is de meerwaarde van verkeersmanagementdiensten die zijn afgestemd op de verwachte in plaats van de huidige verkeerssituatie?

1.3 Leeswijzer

Dit rapport beschrijft de resultaten van de evaluatie van scenarioanalyses over de potentie van publiek private samenwerking bij het beperken van hinder in het kader van de VenR-opgave. In

hoofdstuk 2 wordt de gehanteerde methode beschreven, en wordt een speltheoretisch raamwerk geïntroduceerd. Hoofdstuk 3 gaat in op gebruikerstypen die kunnen worden onderscheiden. De samenwerkingsvormen worden gemodelleerd aan de hand van een aantal spellen, die in hoofdstuk 4 worden uiteengezet. Hoofdstuk 5 gaat in op de scenario's en het beoordelingskader. Hoofdstuk 6 beschrijft de resultaten van de simulaties. In hoofdstuk 7 wordt een synthese en discussie gepresenteerd. Suggesties voor vervolgonderzoek worden ook gepresenteerd in hoofdstuk 7

2 Methodologische Opzet

Het onderzoek is uitgevoerd aan de hand van een aantal scenarioanalyses, waarbij de effecten van verschillende vormen van samenwerking worden gesimuleerd. Hierbij wordt er gebruik gemaakt van dynamisch verkeersmodel MARPLE (Model for Assignment and Regional Policy Evaluation) om de effecten te kunnen bepalen. Per scenario wordt gevarieerd in:

- Samenwerkingsvorm: geen samenwerking, publiek-publieke samenwerking, verschillende PPS-coalities, en een 'grand coalition' waarbij alle (gemodelleerde) partijen samenwerken;
- Informatie-uitwisseling: delen of niet delen van informatie over verkeerssituaties tussen de verschillende (publieke en private) partijen;
- Coördinatie van services: afstemmen of onafhankelijk inzetten van adviezen en verkeersmanagementmaatregelen;
- Tijdsdimensie: reactieve (huidige situatie) versus anticiperende (voorspelde situatie) besluitvorming.

De simulatie kent een aantal simulatieparameters, te weten

- Verkeerssituatie: een capaciteitsreductie als gevolg van wegwerkzaamheden wordt aangenomen, evenals de duur van de capaciteitsreductie en de tijdsafhankelijke verkeersvraag;
- Keuzegedrag: van alle keuzes die reizigers moeten maken voor en tijdens hun reis beschouwen we in deze studie alleen routekeuze. We veronderstellen daarmee dat de keuze om al dan niet te gaan, de keuze van de bestemming, van vervoerwijze en het tijdstip van reizen niet worden beïnvloed door de verkeersmanagement maatregelen en de services van de private partijen.
- Typen gebruikers: weggebruikers hebben al dan niet toegang tot informatie, en maken al dan niet gebruik van deze informatie. In beginsel onderscheiden we daarbij de volgende typen:
  - Geen toegang tot informatie (routes worden bepaald op basis van gewoontegedrag),
  - Toegang tot generieke informatie (routes worden bepaald op basis van generieke informatie zoals gecommuniceerd via bijvoorbeeld radio of dynamische routeinformatie panelen (DRIPs)),
  - Toegang tot gepersonaliseerde navigatie-informatie (routes worden bepaald op basis van routeadvies gecommuniceerd via (smartphone)applicatie, systeemadvies);
- Opvolggedrag: variabel percentage gebruikers dat gebruik maakt van de aangeboden informatie, zoals het opvolgen van een advies.

2.1 Modellering

Het verkeerssysteem bestaat uit de vraag naar en het aanbod van infrastructuur. Om de interactie van vraag en aanbod zo goed mogelijk te laten plaatsvinden onderscheiden we, naast de weggebruikers en infrastructuur, ook partijen die zowel de infrastructuur als het gebruik daarvan kunnen beïnvloeden. We modelleren dit als spelers die met elkaar interacteren. Deze interactie wordt gemodelleerd als een hiërarchisch wiskundig probleem. We onderscheiden daarbij

- wegbeheerders en serviceproviders die maatregelen en adviezen optimaliseren;
- weggebruikers die routekeuzes maken op basis van beschikbare informatie.

Om deze interactie verder uit te werken gebruiken we een aanpak uit de speltheorie, waarbij spelers al dan niet in samenwerking iets proberen te optimaliseren. Dit wordt normaliter gevat in een bilevel of hierarchisch optimalisatieprobleem. Spelers in het zgn. upper level zijn wegbeheerders van een stedelijk, provinciaal en landelijk netwerk en serviceproviders van verkeersinformatie zoals een leverancier van een navigatiesysteem. Daarnaast is het gebruikelijk in een dergelijk wiskundig probleem om elk type weggebruiker ook als een speler te modelleren in het zgn. lower level. Dit probleem is hiërarchisch omdat de wegbeheerders en serviceproviders hun maatregelen en adviezen in wezen eerst bepalen en de weggebruikers gegeven deze keuzes (en dus de beschikbare informatie)

al dan niet hun route aanpassen. De interactie tussen spelers is gemodelleerd aan de hand van een raamwerk dat in volgende sectie verder wordt gespecificeerd.

2.2 Speltheoretisch raamwerk

Om de interactie tussen partijen die verkeersmanagementdiensten aanbieden (serviceproviders en wegbeheerders) te modelleren, beschouwen we als uitgangspunt een spel met N spelers. In beginsel handelen deze spelers niet-coöperatief en proberen hun eigen doelfunctie te optimaliseren. Daarbij worden zij geconfronteerd met keuzes van de andere spelers in het spel. We formuleren zo'n spel binnen een wiskundig optimalisatiekader.

Beschouw speler i, met bijbehorende toegelaten verzameling $C_i \in \mathbb{R}^{n_i}$ en beslissingsvariabele $x_i \in \mathbb{R}^{n_i}$. De doelfunctie $f_i(x_1, \ldots, x_N)$ is een functie van de beslissingen van alle spelers in het spel, maar de beslissingen van de andere spelers, aangeduid met $x_{-i} := (x_1, \ldots, x_{i-1}, x_{i+1}, \ldots, x_N)$, kunnen niet door speler i worden bepaald. Volgens de standaardtheorie van Nash-evenwichten wordt speler i, gegeven of onder voorwaarde van de keuzes van de andere spelers aangeduid met $\bar{x}_{-i}$, geconfronteerd met optimalisatieprobleem

$$P(\bar{x}_{-i}): \qquad \min_{x_i} f_i(x_i, \bar{x}_{-i}) \quad \text{z.d.} \quad x_i \in C_i.$$

In wezen verschijnen in $P(\bar{x}_{-i})$ de keuzes van de andere spelers als parameters. Voor het vervolg nemen we aan dat de toegelaten verzamelingen C_i, $i = 1, \ldots, N$, onafhankelijk zijn van keuzes van spelers, en niet-leeg, polyhedraal convex en compact zijn. Als er verder wordt aangenomen dat $f_i(x_i, \bar{x}_{-i})$ differentieerbaar is met betrekking tot x_i bestaat er dus een oplossing voor $P(\bar{x}_{-i})$.

$\bar{x} = (\bar{x}_1, \bar{x}_2, \ldots, \bar{x}_N) \in C_1 \times C_2 \times \cdots \times C_N \subseteq \mathbb{R}^n$ wordt een (conventioneel) *Nash-evenwicht* genoemd als $\bar{x}_i$ voor $i = 1, 2, \ldots, N$ een oplossing is van optimalisatieprobleem $P(\bar{x}_{-i})$, ofwel:

$$f_i(\bar{x}_i, \bar{x}_{-i}) \leq f_i(x_i, \bar{x}_{-i}) \quad \text{voor alle} \quad x_i \in C_i. \tag{1}$$

Als we verder aannemen dat doelfunctie $f_i(x_i, \bar{x}_{-i})$ convex is met betrekking tot x_i, dan is

$$\nabla_{x_i} f_i(\bar{x}_i, \bar{x}_{-i})^T d_i \geq 0, \qquad \text{voor alle } d_i \in T_{C_i}(\bar{x}_i)$$

een noodzakelijke en voldoende voorwaarde voor optimaliteit van $\bar{x}_i \in C_i$ voor $P(\bar{x}_{-i})$. Hierbij duidt $T_{C_i}(\bar{x}_i) \subseteq \mathbb{R}^{n_i}$ op de raak- (Bouligand-) kegel van C_i bij $\bar{x}_i$. De voorwaarde dat $\bar{x}_i$ een optimale oplossing is voor $P(\bar{x}_{-i})$ kan dus worden herschreven als variationele ongelijkheid (*variational inequality*) of gegeneraliseerde vergelijking (*generalized equation*)

$$-\nabla_{x_i} f_i(\bar{x}_i, \bar{x}_{-i}) \in \mathcal{N}_{C_i}(\bar{x}_i),$$

met $\mathcal{N}_{C_i}(\bar{x}_i) \subseteq \mathbb{R}^{n_i}$ de normaal kegel van C_i bij $\bar{x}_i$.

In evenwicht moet bovenstaande voorwaarde gelijktijdig gelden voor alle i, d.w.z.: voor alle spelers. Aangezien $\mathcal{N}_{C_1 \times C_2 \times \cdots \times CN}(\bar{x}) = \mathcal{N}_{C_1}(\bar{x}_1) \times \mathcal{N}_{C_2}(\bar{x}_2) \times \cdots \times \mathcal{N}_{CN}(\bar{x}_n)$ (Rockafellar and Wets, 1998), kan het zogenaamde *variationele Nash-evenwicht* worden weergegeven als variationeel ongelijkheidsprobleem (Rockafellar, 2018)

$$\text{vind } \bar{x} \in C \quad \text{zodanig dat} \quad -F(\bar{x}) \in \mathcal{N}_C(\bar{x}), \tag{2}$$

met $C := C_1 \times C_2 \times \cdots \times C_N$, $F : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^n$ (waarbij $n := \sum_{i=1}^N n_i$) en

$$F(x) := (\nabla_{x_1} f_1(x_1, x_{-1}), \ldots, \nabla_{x_N} f_N(x_N, x_{-N})).$$

Merk op dat als $f_i(x_i, \bar{x}_{-i})$ niet convex is in x_i, het oplossen van probleem $P(\bar{x}_{-i})$ mogelijk niet equivalent is aan het vinden van een oplossing voor de meer algemene variationele ongelijkheid. Verder is algemeen bekend dat slechts onder zeer specifieke omstandigheden het probleem van het vinden van een (gebruikers)evenwicht in verkeerstoedelingen als een optimalisatieprobleem kan worden geformuleerd. In veel gevallen kunnen zulke stromen echter worden gevonden door het

oplossen van een variationele ongelijkheid, zoals bijv. (2). Dit impliceert dat indien een navigatie serviceprovider als doel heeft om haar gebruikers via de snelste route te sturen aan de hand van gepersonaliseerd (dus: gedifferentieerd) reisadvies, dat er geen doelstellingsfunctie f_i kan worden gedefinieerd voor deze speler.

Daarentegen, als voor elke speler i een geschikte g_i wordt gedefinieerd, met

$$F(x) := (g_1(x_1, x_{-1}), \ldots, g_N(x_N, x_{-N})),$$

levert bijbehorende gegeneraliseerde vergelijking (2) een veel ruimere klasse van onder meer evenwichtsproblemen op, aangezien men kan kiezen voor $g_i := \nabla_{x_i} f_i$. Een voorbeeld: indien een deterministisch gebruikersevenwicht dient te worden bepaald wordt normaliter voor g_i de vector met reistijd of (gegeneraliseerde) kosten voor elke route gekozen. Aannemende dat een navigatie serviceprovider als doel heeft om gebruikers via de snelste route te sturen kan dus aan de hand van een variationeel Nash evenwicht kan het gedrag van deze partij worden gemodelleerd.

Een andere aanname in bovenstaande analyse is dat, indien $f_i(x_i, \bar{x}_{-i})$ kan worden gedefinieerd, deze ten minste continu differentieerbaar is in x_i. In het geval van een dynamische verkeerstoedeling geldt dit mogelijk niet, of is het afleiden van (partiële) afgeleiden een uitdaging (Taale, 2008). In een dergelijk geval is het dus niet mogelijk om met de eerste orde optimaliteitscondities te werken, en om een gegeneraliseerde vergelijking te formuleren zoals (2). Er zijn dan in wezen twee opties om $P(\bar{x}_i)$ op te lossen: werken met meer algemene vormen van afgeleiden, of het gebruikmaken van zogenoemde afgeleidevrije (*derivative-free*) technieken.

In dit onderzoek beschouwen we een gemengd evenwicht, dat wil zeggen een situatie waarin voor een deel van de spelers geen doelstellingsfunctie f_i kan worden gedefinieerd (maar g_i wel beschikbaar is), en voor de andere spelers deze functie wel is gedefinieerd maar dat de conventionele gradiënt van f_i niet wordt of niet kan worden bepaald. Daarom definiëren we een evenwichtsvoorwaarde met een mix van een conventioneel en een variationeel Nash-evenwicht.

Een situatie wordt beschouwd waarin de eerste $1 \leq m < N$ spelers degenen zijn waarvoor geen doelstellingsfunctie kan worden gedefinieerd, en voor de overige spelers $(m+1, \ldots, N)$ wel een doelstellingsfunctie kan worden bepaald maar dat de conventionele gradiënt niet beschikbaar is. Een Nash evenwicht kan dan als volgt worden gedefinieerd. $\bar{x} \in C$ is in evenwicht als

$$-F^m(\bar{x}) \in \mathcal{N}_{C^m}(\bar{x}^m),$$

met

$$F^m(\bar{x}) := (g_1(\bar{x}_1, \bar{x}_{-1}), \ldots, g_m(\bar{x}_m, \bar{x}_{-m})) \quad \text{en} \quad C^m = C_1 \times C_2 \times \cdots \times C_m,$$

geldt, terwijl voor spelers $i = m+1, \ldots, N$ geldt dat

$$f_i(\bar{x}_i, \bar{x}_{-i}) \leq f_i(x_i, \bar{x}_{-i}) \quad \text{voor alle} \quad x_i \in C_i.$$

Het raamwerk kan worden geïllustreerd aan de hand van een spel met twee spelers: één wegbeheerder en één navigatie serviceprovider. De beslissingsvector van de wegbeheerder wordt aangeduid met x_1, dit gaat bijvoorbeeld om groentijden voor signaalgroepen van de verkeersregelinstallaties (VRI's) in het netwerk. De beslissingsvector van de navigatie serviceprovider wordt aangeduid met x_2. In het geval dat alle gebruikers routeadvies opvolgen, dan is x_2 de vector met routefracties per periode. Gegeven $\bar{x} = (\bar{x}_1, \bar{x}_2)$ kunnen de periode afhankelijke routekosten worden bepaald, aangeduid met $c(\bar{x})$. Weggebruikers die gebruikmaken van navigatie krijgen een gepersonaliseerde route gesuggereerd waarbij een gebruikersevenwicht wordt getracht te realiseren. Gegeven de groentijden $\bar{x}_1$, is het bijbehorende wiskundig probleem

$$-c(\bar{x}_2, \bar{x}_1) \in \mathcal{N}_{C_2}(\bar{x}_2).$$

Tegelijkertijd probeert de wegbeheerder gegeven routefracties $\bar{x}_2$ bijvoorbeeld de totale (generaliseerde) 'kosten' of reistijd op het netwerk te minimaliseren, d.w.z. in evenwicht is $\bar{x}_1$ een oplossing van optimalisatieprobleem

$$P(\bar{x}_{-1}): \qquad \min_{x_1} f_1(x_1, \bar{x}_2) = \langle \bar{x}_2, c(x_1, \bar{x}_2) \rangle \quad \text{s.t.} \quad x_1 \in C_1.$$

Hierbij moet worden opgemerkt dat het geïntroduceerde spel simultaan wordt gespeeld. Dit is werkelijk anders dan een *Stackelberg* spel, waarin één van de spelers een *temporeel voordeel* heeft. Dat wil zeggen: één van de twee spelers maakt een keuze voordat een andere speler dat doet. In dit geval bijvoorbeeld kan de wegbeheerder de groentijden voor signaalgroepen voor elke periode bepalen, en communiceert deze groentijden met de navigatie serviceprovider, voordat die haar gebruikers routeadvies geeft. Tegelijkertijd kan de wegbeheerder in dit geval rekening houden, d.w.z. anticiperen, op de keuzes van de serviceprovider (Taale, 2008).

Conventionele numerieke methoden gebruiken een projectiemethode om een variationeel Nash evenwicht te vinden indien dat probleem als een varationeel ongelijkheidsprobleem zoals (2) kan worden geformuleerd . De projectie mapping $\mathcal{P}_C$ wordt daarvoor gebruikt, d.w.z.

$$-F(\bar{x}) \in \mathcal{N}_C(\bar{x}) \quad \text{dan en slechts dan als} \quad \mathcal{P}_C(\bar{x} - F(\bar{x})) - \bar{x} = 0.$$

In het geval dat er een doelstellingsfunctie beschikbaar is, waarvoor er geen conventionele gradient voor handen is, dient een afgeleidevrije methode te worden gebruikt waardoor de projectiemethode niet direct kan worden toegepast. In dit onderzoek wordt een genetisch algoritme toegepast voor het oplossen van probleem $P(\bar{x}_{-i})$. Dit wordt verder toegelicht in Hoofdstuk 4.

3 Gebruikerstypen

In de simulatieomgeving wordt de routekeuze van weggebruikers gemodelleerd, waarbij zij eventueel toegang hebben tot informatie en hier al dan niet gebruik van maken in hun keuze voor een route. Hierbij kan er onderscheid worden gemaakt naar reis- en routeinformatie. Reisinformatie gaat over de situatie op de weg en routeinformatie gaat over de te rijden route.

De toegang tot en het gebruik van informatie hangt samen met de situatie op de weg. Voor wat betreft de verkeerssituatie wordt in het raamwerk van Wilmink et al. (2003) onderscheid gemaakt tussen reguliere situaties en niet-reguliere situaties, die voorspelbaar of niet-voorspelbaar zijn. Op basis van dit raamwerk is er in het geval van de beschouwde wegwerkzaamheden met een verandering in capaciteit (bijv. afsluiting rijstroken) sprake van een niet-reguliere maar voorspelbare verkeerssituatie. Dit impliceert dat relevante reis- en routeinformatie in ieder geval voor wat betreft werkzaamheden beschikbaar kan zijn voor een weggebruiker zowel voor vertrek (*pre-trip*) als tijdens de reis (*on-trip*).

Regelmatig wordt er aan de hand van vragenlijsten geprobeerd inzicht te verkrijgen in de ontwikkelingen rondom wegverkeergerelateerde informatiediensten, zie bijvoorbeeld de monitoren van Goudappel (2025) en Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (2024). Op basis van deze monitoren kan een uitspraak worden gedaan over de toegang tot en ontvankelijkheid voor informatie van weggebruikers. Hiervoor wordt er door Goudappel (2025) een onderscheid gemaakt naar het moment en de manier waarop informatie wordt gecommuniceerd, te weten

- *Pre-trip*: voor de reis
- *On-trip, in-car*: tijdens de reis, informatie wordt ontsloten door een systeem in de auto
- *On-trip, wegkant*: tijdens de reis, informatie wordt ontsloten door een systeem langs de weg.

Op basis van de monitorrapportages kan worden geconcludeerd dat in beginsel vrijwel alle weggebruikers toegang hebben tot digitale reisinformatie (96% in 2022, zie Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (2024)). Daarnaast heeft het merendeel van de weggebruikers één of meerdere navigatiesystemen (smartphone, ingebouwd of los) tot zijn beschikking (96% van de weggebruikers in 2024, Goudappel (2025)). Hierdoor is voor het grootste deel van de weggebruikers mogelijk informatie in te winnen voor de reis (pre-trip) als gedurende de reis (on-trip), en via in-car en wegkantsystemen. Informatie wordt voornamelijk geraadpleegd bij onbekende of minder vaak gereden routes (97% van de weggebruikers) (Goudappel, 2025). Dit percentage ligt een stuk lager wanneer een bekende route wordt gereden (71%). Navigatie applicaties worden verreweg het meest gebruikt als informatiebron voorafgaand aan de reis (88%).

Informatie wordt ontsloten door verschillende partijen. Een reeks aan applicaties wordt gebruikt om toegang te krijgen tot pre-trip en on-trip informatie. Met name Google Maps wordt vaak gebruikt. 55% van de weggebruikers geeft aan ook informatie van bijvoorbeeld Rijkswaterstaat te raadplegen. Pre-trip routesuggesties wordt veelal opgevolgd (29% bijna altijd, 92% regelmatig tot altijd) (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2024).

Naast in-car informatie, wordt er ook informatie gecommuniceerd via wegkantsystemen, zoals tijdelijke borden en DRIPs. Op basis van Goudappel (2025) kan worden geconcludeerd dat in het routeinformatie via wegkantsystemen doorgaans door meer dan 80% van de weggebruikers wordt gebruikt. 37% van de respondenten geeft aan omleidingsadvies altijd op te volgen, 85% geeft aan dit regelmatig tot altijd te doen. Door onder meer het verschil in kwaliteit en compleetheid van verkeersinformatie tussen verschillende partijen kan het voorkomen dat in-car informatie niet overeenkomt met de informatie zoals gecommuniceerd via wegkantsystemen: "in dat geval geeft 47% aan op de snelweg de route te volgen op het navigatiesysteem, 24% daarentegen volgt de route die staat aangegeven op de borden en 29% combineert zowel de informatie van de navigatiesystemen met dat wat er aangegeven staat op de weg" (p. 43 Goudappel (2025)), al is dit afhankelijk van de leeftijdgroep, zie Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (2024). Weggebruikers die hun route niet aanpassen, geven hiervoor verschillende redenen. Een veelgenoemde reden is dat zij goed bekend zijn in de omgeving en liever zelf kiezen (55%), of omdat zij aangeven dat de alternatieve route niet beter is (30%) (Goudappel, 2025).

Bovenstaande gegevens zijn gebruikt voor het vaststellen van verschillende type gebruikers waarbij er onderscheid wordt gemaakt naar de toegang tot en ontvankelijkheid van informatie (Taale, 2020; Chen, 1998; Calvert et al., 2025). Op basis van de monitoren kan worden geconcludeerd dat vrijwel iedereen toegang heeft tot informatie (zowel pre-trip als on-trip). Uitspraken over het opvolggedrag zijn gecompliceerder, omdat dit bijvoorbeeld kan afhangen van in hoeverre gebruikers bekend zijn in de regio, en in hoeverre een gesuggereerde route door een navigatiesysteem afwijkt van de gebruikelijke route.

In het onderzoek zijn gebruikerstypen gedefinieerd gebaseerd op opvolggedrag, te weten

- Gewoontegebruikers: kiezen 'vaste' of gebruikelijke routes ("weigeren hun dagelijkse routine aan te passen" of zijn bekend in de regio)
- Pre-trip geïnformeerde gebruikers: hebben een gepersonaliseerd routeadvies ontvangen o.b.v. verwachte verkeerscondities,
- On-trip geïnformeerde gebruiker op basis van generieke informatie gecommuniceerd via wegkantsystemen of in-car reisinformatie (bijv. radio), d.w.z. generieke niet-gepersonaliseerde informatie die wordt gebruikt in de routekeuze,
- On-trip geïnformeerde gebruiker met gepersonaliseerde informatie: in-car informatie ontvangen via bijvoorbeeld een navigatiesysteem, d.w.z. een routeadvies op basis van actuele of voorspelde verkeerssituatie waarbij er expliciet rekening wordt gehouden met bijvoorbeeld de bestemming van de individu.

Het bepalen van fracties gebruikersgroepen is een uitdaging. Deze fracties kunnen niet eenduidig vooraf worden bepaald, aangezien de ontvankelijkheid afhangt van de verkeerssituatie en de informatie (geeft DRIP iets anders aan dan navigatiesysteem, en is de informatie relevant voor de gebruiker?). Daarnaast hangt opvolggedrag ook af van potentiële of gepercipieerde reistijdwinst (Eikenbroek et al., 2018), en of men bekend is met de route. Het kan ook voorkomen dat een gesuggereerde route overeenkomt met een vaste of gebruikelijke route.

In de simulaties wordt er onderscheid gemaakt tussen

- gewoontegebruikers;
- gebruikers die advies navigatiesystemen opvolgen (gepersonaliseerd advies);
- gebruikers die informatie van wegkantsysteem gebruiken voor hun routekeuze (niet-gepersonaliseerde informatie).

Dit komt grofweg overeen met Taale (2020) waar er wordt er uitgegaan van (i) reizigers die geen gebruikmaken van routeinformatie (gewoontegedrag) (ii) reizigers die gebruikmaken van niet-gepersonaliseerde routeinformatie (gecommuniceerd via radio) en (iii) reizigers die gebruikmaken van gepersonaliseerde informatie en routesuggesties.

Hierbij moet worden opgemerkt dat voor wat betreft het wegkantsysteem wordt uitgegaan van een DRIP, waarbij normaliter bijvoorbeeld reistijden van routes worden weergegeven. In vervolgonderzoek kan er voor wat betreft gebruikerstypen verder onderscheid worden gemaakt naar korte/lange ritten dan wel binnen-stedelijke als buiten-stedelijke ritten, aangezien informatie veelal geraadpleegd wordt voor lange routes die niet vaak gereden worden, en minder vaak op korte routes die frequenter gereden worden.

4 Spellen

Eerste positieve ervaringen op het gebied van samenwerking in verkeersmanagement zijn opgedaan in het Socrates2.0 project, een Europees samenwerkingsverband van wegbeheerders, dienstverleners en autofabrikanten (Groenendijk et al., 2021).In het kader van dat project zijn drie samenwerkingsmodellen gedefinieerd: *exchanged data*, *shared view* en *coordinated approach*. Het eerste samenwerkingsmodel wordt met name geschikt geacht om verkeersinformatie *in-car* te brengen, bijvoorbeeld informatie over tolheffing en zero-emissie zones. Bij *shared view* is het doel om een gezamenlijk beeld te krijgen van de verkeerssituatie, d.w.z. dat er geacteerd kan worden op basis van een gedeelde gepercipieerde verkeerssituatie. Bij een *coordinated approach* is er ook sprake van het coördineren van (de inzet van) services.

In dit project worden de effecten van bepaalde vormen van samenwerking onderzocht. Hiertoe volgen we de aanpak die doorgaans in speltheorie wordt gevolgd. We beschouwen verkeersmanagement dus als een spel waar een aantal spelers acteren, elk met al dan niet een eigen doel. Per spel is gespecificeerd in hoeverre er informatie uitwisseling plaatsvindt, of er reactief dan wel anticiperend gehandeld wordt, en of er sprake is van coördinatie bij het inzetten van de services. Met andere woorden: dit betreft een operationalisatie van samenwerkingsmodellen. Hierbij gaan we uit van vier spelers die verkeersmanagementservices aanbieden: een nationale wegbeheerder, een lokale wegbeheerder en twee serviceproviders die een navigatiedienst met routeadvies aanbieden. De aanpak in dit hoofdstuk kan natuurlijk naar believen worden uitgebreid met meer en ook andere spelers.

Waar in beginsel elke speler meerdere potentieel conflicterende doelstellingen kan hebben, gaan we in deze studie uit van een situatie waarbij elke speler één doelstelling heeft. Wegbeheerders zijn geïnteresseerd in de prestatie van hun eigen deel van het verkeersnetwerk. De nationale wegbeheerder kan door middel van een DRIP reistijden op verschillende routes weergeven en daarmee een route suggereren. Een lokale wegbeheerder kan groentijden bij VRI's op het onderliggend wegennet aanpassen en daarmee de verkeerssituatie beïnvloeden (zie Hoofdstuk 5.3). Navigatie serviceproviders hebben als doel om de beste route aan te bieden aan hun gebruikers (gepersonaliseerd routeadvies), waarbij in dit geval ervan uit wordt gegaan dat dit om de snelste route gaat. Deze doelstellingen zijn potentieel conflicterend, d.w.z. in beginsel handelen de spelers niet gezamenlijk om het systeem te optimaliseren. Zo kan een lokale wegbeheerder beogen de doorstroming op het onderliggend wegennetwerk te verbeteren door de instroom vanaf het hoofdwegennet te beperken en daarmee een terugslag naar het hoofdwegennet veroorzaken

In dit onderzoek wordt de situatie binnen een dag beschouwd. Gedurende de dag krijgen spelers meer en meer informatie tot hun beschikking, en passen beslissingen aan op basis van deze informatie. In het geval van het proactief inzetten van verkeersmanagementservices wordt er niet alleen geacteerd op basis van informatie die beschikbaar is maar wordt er ook rekening gehouden (d.w.z. geanticipeerd) op informatie die nog beschikbaar moet komen. Daarbij hebben spelers te maken met een hoge mate van onzekerheid, bijvoorbeeld over hoe de verkeerssituatie zich gaat ontwikkelen binnen een dag, wat in hoge mate kan afhangen van het handelen van andere partijen en de reactie van weggebruikers hierop.

We onderscheiden een aantal scenario's voor wat betreft de samenwerking tussen partijen en de manier van handelen. De scenario's worden hieronder verder toegelicht.

Do nothing

Het do-nothing scenario geeft een beeld over wat er zou zijn gebeurd als er geen services worden ingezet door serviceproviders en wegbeheerders als gevolg van de capaciteitsbeperking. Dit scenario is in beginsel geen realistisch scenario aangezien er wordt aangenomen dat serviceproviders en wegbeheerders geen bijzondere acties ondernemen ondanks dat zij aan de hand van hun informatiebronnen potentieel waarnemen dat er bijvoorbeeld congestie optreedt. Dit scenario fungeert dus enkel als baseline of referentie.

Om deze situatie te modelleren in MARPLE worden weggebruikers toegedeeld aan de hand van routefracties die het gewoontegedrag weergeven (volgend uit het reguliere scenario), d.w.z.: een

one-shot toedeling. De aanname is dus dat weggebruikers hun gebruikelijke route volgen. Voor wat betreft het onderliggend wegennet wordt aangenomen VRI's voertuig- of verkeersafhankelijk geregeld zijn (geintegreerd in MARPLE).

Het reguliere scenario betreft een evenwichtssituatie voor het geval dat er geen capaciteitsbeperking is. Aangezien dit een (dagelijks) terugkerende verkeerssituatie betreft kan er worden aangenomen dat er na enige periode een evenwichtssituatie ontstaat. De routefracties per periode behorende bij dit evenwicht worden gebruikt om het gewoontegedrag van weggebruikers te modelleren. Hiervoor wordt een stochastisch gebruikersevenwicht (SUE) bepaald, aan de hand van het in MARPLE geintegreerde C-Logit model met parameters $\theta = 1$, $\beta = 1$, $\gamma = 2$. De serviceproviders en de landelijke wegbeheerder zetten hier verder geen services in. De aanname is dat de VRI's op het onderliggend wegennet voertuig- of verkeersafhankelijk geregeld zijn.

Business-as-usual

Het doel van het simuleren van het business-as-usual scenario is om in te schatten wat de verkeerseffecten zijn van het inzetten van verkeersmanagementdiensten in de huidige praktijk. Uitgangspunt is hier dat serviceproviders en wegbeheerder hun maatregelen reactief inzetten om hun eigen doelfunctie optimaliseren zonder daarbij rekening te houden met de informatiebeschikbaarheid, beslissingen en doelen van andere wegbeheerders en serviceproviders. Dit is als volgt gemodelleerd.

Gebruikers van navigatie serviceproviders verzamelen informatie over onder meer reistijden. De gerealiseerde reistijden van deze gebruikers kunnen worden gebruikt voor reactief routeadvies. In dat geval wordt voor andere gebruikers een route gesuggereerd die op basis van de gerealiseerde tijden het snelste is. In dit geval is het uitgangspunt dat gerealiseerde reistijden van segmenten worden gebruikt door de serviceproviders voor een inschatting van de (instantane) reistijd op een route. Door natuurlijke variatie in de snelheden van en tussen weggebruikers en de veranderende verkeerssituatie, neemt de onzekerheid over de accuraatheid van een dergelijke reistijdschatting toe naarmate er minder gebruikers van een serviceprovider gebruikmaken van een segment of route. Tegelijkertijd kan een serviceprovider wel een grove schatting doen van de reistijd op een route, zelfs als er geen van zijn gebruikers data verzamelt over een bepaald deel van het netwerk. In dat geval is aangenomen dat de situatie 'free-flow' is, en dat de snelheid op een segment overeenkomt met de maximaal toegestane snelheid. Op basis hiervan kan dan een reistijd worden bepaald.

Voor het modelleren van dit scenario is aangenomen dat navigatie serviceproviders elke periode (bijv. elke 15min) een nieuwe routesuggestie bepalen. Hiervoor worden gerealiseerde reistijden van gebruikers van de navigatieservice gebruikt. De variatie in reistijden wordt gevat aan de hand van een stochast. In MARPLE is voor elke tijdstap (normaliter 20sec) een reistijd beschikbaar voor elk segment. Na afloop van een periode is er dus een reeks reistijden beschikbaar, waarvan kan worden aangenomen dat dat gerealiseerde reistijden zijn. Dit wordt gebruikt voor een schatting van het gemiddelde ($\hat{\mu}$) en de standaarddeviatie ($\hat{\sigma}$).

De toenemende onzekerheid bij navigatie serviceproviders over de reistijd bij minder gebruikers wordt gemodelleerd door de standaarddeviatie te schalen met de inverse van het aantal gebruikers. Dit wordt gevat door voor elk segment gebruik te maken van normaalverdeling $\mathcal{N}(\hat{\mu}, \hat{\min}\{10, \frac{1}{\alpha}\}\sigma)$, met $\alpha \in (0, 1)$ het relatief aantal gebruikers voor de serviceprovider op de betreffende route. Idealiter was er gebruik gemaakt van het aantal gebruikers van serviceprovider per segment, maar dat vraagt een verdere uitbreiding van de gebruikte software.

Initieel aannemende dat reistijden normaal verdeeld zijn (benaderd door $\mathcal{N}(\hat{\mu}, \hat{\sigma})$) wordt er reactief gehandeld, d.w.z. een route bepaald die geadviseerd wordt. De reistijd voor een route wordt geschat door een Monte Carlo simulatie waarbij er willekeurig wordt getrokken uit de verdeling van stochastische reistijden per segment en deze vervolgens bij elkaar op te tellen. Voor het bepalen van de route die wordt gesuggereerd wordt de *Conditional Value-at-Risk* (CVaR) gebruikt (Rockafellar and Uryasev, 2002). De CVaR zegt iets over de staart van een verdeling. Voor een betrouwbaarheid van bijvoorbeeld 10% geeft de CVaR het gemiddelde voor de slechtste 10% van de gevallen. De reverse CVaR geeft het gemiddelde voor de beste 10% van de gevallen (Trivella, 2018). Door gebruik te maken van de reverse CVaR op basis van de getrokken routereistijden wordt hiermee gevat dat een serviceprovider de snelheid op routes die weinig worden gebruikt (dus waar

weinig data voor wordt verzameld) overschat. Aangezien het vrij onwaarschijnlijk is dat er voor één herkomstbestemmingspaar meerdere routes zijn met dezelfde CVaR, suggereert een navigatie serviceprovider voor elke periode één route.

De nationale wegbeheerder maakt normaliter gebruikt van met name (dubbele) inductielussen om informatie over snelheden te verzamelen. Op basis hiervan kan een instantane reistijd worden bepaald voor een route. Er wordt aangenomen dat deze instantane reistijd wordt gebruikt voor routeinformatie per periode zoals gecommuniceerd door de DRIP. Voor wat betreft de lokale wegbeheerder wordt aangenomen dat er geen bijzondere regeling wordt toegepast, d.w.z. MARPLE's verkeer- of voertuigafhankelijke VRI module wordt toegepast in dit scenario.

Geïsoleerd

Dit scenario gaat uit van het geïsoleerd handelen van wegbeheerders serviceproviders, maar waarbij er wel (in beperkte mate) informatie uitwisseling tussen partijen plaatsvindt. Serviceproviders en wegbeheerders bepalen de inzet van maatregelen zonder kennis van beslissingen van andere spelers voor de huidige of toekomstige perioden. Beslissingen van andere spelers tijdens eerdere perioden (d.w.z.: wat andere partijen hebben gedaan) kunnen echter wel worden geobserveerd of zijn gecommuniceerd

In het raamwerk zoals gepresenteerd in Hoofdstuk 2.2 ontstaat een evenwicht als alle spelers hun eigen doelfunctie optimaliseren, gegeven de keuzes van de andere spelers. Aannemende dat voor speler i een doelfunctie $f_i(x_i, \bar{x}_{-i})$ kan worden gedefinieerd, wordt in dit geïsoleerd spel aangenomen dat een speler alleen informatie heeft over wat andere spelers hebben gedaan. Zonder verdere informatie neemt de betreffende partij aan dat de overige spelers niet van keuzes veranderen in de (nabije) toekomst. Voor periode k, neemt speler i beslissing $\bar{x}_i^k$, en de andere spelers $\bar{x}_{-i}^k$. Door beperkte informatie uitwisseling tussen de verschillende spelers wordt een aanname $\tilde{x}_{-i}^k$ gedaan over de strategie van andere spelers tijdens deze periode, in dit geval $\tilde{x}_{-i}^k = \bar{x}_{-i}^{k-1}$ en bekijkt speler i optimalisatieprobleem

$$P^k(\tilde{x}_{-i}^k): \qquad \min_{x_i^k} f_i(x_i, \tilde{x}_{-i}) \quad \text{z.d.} \quad x_i^k \in C_i^k,$$

waar superscript k een projectie voor periode k aanduidt. Dit wil zeggen dat elke speler anticiperend handelt, maar alleen de invloed van zijn eigen keuzes op de toekomstige verkeerssituatie meeneemt. Voor een navigatie serviceprovider betekent dit dat hij een gebruikersevenwicht tracht te bereiken gegeven de gepercipieerde routefracties van de overige serviceproviders en de groentijden en de informatie gecommuniceerd op het DRIP. Voor een wegbeheerder betekent dit dat hij de TTS voor het relevante subnetwerk probeert de optimaliseren gegeven de routefracties die gerealiseerd zijn naar aanleiding van het advies van navigatie serviceproviders, en de inzet van maatregelen van overige wegbeheerders tijdens de vorige periode. Een evolutionaire strategie wordt toegepast om groen- en cyclustijden te bepalen, en om het routeadvies voor de DRIP te bepalen. Hiervoor wordt het ingebouwde genetisch algoritme (GA) van MATLAB gebruikt. Hierbij moet worden opgemerkt dat er conflicterende doelstellingen zijn tussen partijen, en dat zelfs als er volledige informatie beschikbaar is over het acteren van andere spelers dat partijen niet gezamenlijk handelen om het systeem te optimaliseren.

Nash spel

In het zgn. Nash spel heeft elke serviceprovider en wegbeheerder kennis van de strategie en doelfuncties van de andere spelers. Dit levert in beginsel niet de beste uitkomst voor het systeem op, spelers handelen immers niet coöperatief. Tegelijkertijd wordt er in dit spel wel geanticipeerd, zowel op de invloed van handelen van spelers op de toekomstige verkeerssituatie als op de invloed van het handelen van een speler op het handelen van andere spelers (en daarmee weer op de verkeerssituatie en het eigen handelen).

De 'stabiele' uitkomst van een dergelijk spel wordt normaliter gemodelleerd op basis van een Nash evenwicht (ook wel Nash-Cournot evenwicht genoemd) , waarbij in evenwicht geen speler een prikkel heeft om van eenzijdig van strategie te veranderen, zie ook (1). In beginsel hoeft er geen

Nash evenwicht te bestaan. Ook kan het zijn dat er meerdere Nash evenwichten bestaan. Dit wordt uitgebreid besproken in onder meer Malik et al. (2025) en Ohazulike (2014). Numerieke implementaties vinden vaak maar één evenwicht, terwijl in het geval van meerdere evenwichten de prestatie van de verschillende evenwichten sterk kan afwijken. Het bepalen van een (eventueel) Nash evenwicht is gecompliceerd. In tegenstelling tot de setting waarbij er simultaan een spel wordt gespeeld, wordt vaak getracht numeriek een Nash evenwicht te vinden op basis van 'best-response' strategieën. Hierbij wordt gemodelleerd dat spelers om de beurt de beste strategie bepalen gegeven de strategieën van de andere spelers. Hierbij kan een zogenaamd 'flip-flop' effect ontstaan, waarbij bijvoorbeeld de 'best-response' van een speler alterneert tussen twee strategieën en er dus geen convergentie plaatsvindt. Dergelijke uitdagingen kwamen ook naar voren bij de implementatie voor deze studie. Een alternatieve methode voor het bepalen van een Nash of gemengd evenwicht wordt gepresenteerd in Sefrioui and Perlaux (2000). Deze methode optimaliseert de keuze voor een speler gegeven de keuzes van andere spelers tijdens een vorige iteratie.

Op basis van het raamwerk van Taale (2008) is er gekozen voor alternatieve implementatie van de 'best-response' methode. In het Nash spel waarbij er geen coalitievorming plaatsvindt, anticiperen wegbeheerders deels op het handelen van serviceproviders. Dit betekent dat bij het evalueren van een strategie, d.w.z. in het bepalen van de doelwaarde, er rekening wordt gehouden met de reacties van de serviceproviders. Technisch betekent dit dat bij het bepalen van de beste strategie, de strategieën van de service providers niet wordt vastgehouden, maar dat er één iteratie van de projectiemethode wordt uitgevoerd om een inschatting te krijgen van de invloed op het handelen van deze spelers. Daarnaast is 'smoothing' toegepast bij het bepalen van groentijden. Om de invloed van het 'flip-flop' effect te beperken worden tijdens het algoritme wordt het (gewogen) gemiddelde genomen van de best-mogelijke groentijden en de groentijden zoals tot dusverre bepaald.

Coalitie

Verschillende samenwerkingsvormen zijn mogelijk waarbij partijen hun services gezamenlijk inzetten om een gedeeld doel te bereiken. Dat wil zeggen, zgn. coalities worden gevormd waarbij een stabiele uitkomst een Nash evenwicht tussen de verschillende coalities is. Het Nash spel zoals hiervoor gedefinieerd is een bijzonder geval van dit spel, waarin er geen coalities zijn gevormd, of elke coalitie uit één speler bestaat. Uitgangspunt is hier dat indien een serviceprovider een coalitie vormt met een wegbeheerder dat de serviceprovider bereid is om bij te dragen aan het optimaliseren van de doelfunctie van de wegbeheerder. Wanneer er een spel wordt gespeeld waarbij er één grote coalitie wordt gevormd (*grand coalition*) is het mogelijk om een systeemindicator te optimaliseren, wat ook betekent dat onder bepaalde voorwaarden een systeem optimum kan worden bereikt. Dit is lijn met de gecoördineerde aanpak zoals gedefinieerd in het Socrates2.0 project. Voor de implementatie van het spel wordt gebruik gemaakt van het raamwerk zoals geïntroduceerd in voorgaande subsectie.

Voor dit spel zijn verschillende mogelijke coalities gedefinieerd, te weten:

- *RWS-Alm* - Coalitie van wegbeheerders. Dit betreft een publiek-publiek samenwerking, waarbij de lokale en nationale wegbeheerder hun services gecoördineerd inzetten om een indicator van het hele netwerk te optimaliseren. De serviceproviders werken in dit scenario niet samen, d.w.z. niet met elkaar en ook niet met de wegbeheerder, en routeren hun gebruikers via de snelste route.
- *RWS-NSP* - Coalitie nationale wegbeheerder en navigatie serviceprovider. Een publiek-private samenwerking waarbij de nationale wegbeheerder samenwerkt met één navigatie serviceprovider (NSP1) om een netwerkindicator op het hoofdwegennet te optimaliseren. De andere service provider (NSP2) handelt alleen. De lokale wegbeheerder werkt niet samen met de andere wegbeheerder en de serviceproviders.
- *RWS-Alm-NSP* - Coalitie van wegbeheerders en navigatie serviceprovider. Een publiek-privaat samenwerkingsmodel waarbij wegbeheerders samenwerken met een navigatie serviceprovider (NSP1) om een netwerkindicator op het gehele netwerk te optimaliseren. De andere service provider (NSP2) handelt alleen.

- *Grand Coalition.* Een publiek-privaat samenwerkingsmodel waarbij alle partijen samenwerken om de verkeerssituatie naar een systeem optimum te sturen.

In het volgende hoofdstuk worden de simulatiescenario's verder toegelicht, en wordt het beoordelingskader geïntroduceerd.

5 Scenario's en beoordelingskader

5.1 Netwerk, verkeersvraag en services

In de simulaties met MARPLE gaan we uit van een verkeersnetwerk dat is gestileerd naar de situatie in en rond Almelo. We onderscheiden hierbij het hoofdwegennet waar Rijkswaterstaat de wegbeheerder is. In figuur 1 wordt dit deel van het netwerk weergegeven door de wat dikkere lijnen. Het onderste deel van het hoofdwegennet kan worden vergeleken met de A35. Hier veronderstellen we dat er een capaciteitsbeperking is als gevolg van wegwerkzaamheden, aangegeven door het gearceerde wegvak. Daarnaast is het onderliggend wegennet, ofwel stedelijk wegennet, deel van het gebruikte netwerk met de gemeente (Almelo) als wegbeheerder. Dit is weergegeven in het onderste deel van de figuur, met daarin twee geregelde kruispunten.

We onderscheiden drie herkomsten O_1, O_2 en O_3 en vier bestemmingen, D_1, D_2, D_3 en D_4. We modelleren vervolgens een verkeersvraag zodanig dat wanneer weggebruikers dezelfde routes gebruiken als in de situatie zonder wegwerkzaamheden er congestie ontstaat op de rechtstreeks route van O_1 naar D_1, zeg maar de A35. Als gevolg raakt de afrit naar Almelo geblokkeerd, en ook het divergentiepunt voor de langere route 'bovenlangs'. Een herverdeling van verkeer van O_1 naar D_1 over de drie mogelijke routes, over het hoofdwegennet bovenlangs of rechtdoor over de A35, of over het onderliggend wegennet, dus onderlangs door de stad, de problemen grotendeels kan oplossen. De route over het hoofdwegennet rechtdoor duurt in de reguliere situatie ongeveer 13 minuten (22 km), de route bovenlangs 22 minuten (38 km) en de route door Almelo 17 minuten (22 km).

We modelleren een tijdsperiode van 1 uur en 15 minuten (in stappen van 15 minuten), waarbij de standaardinstelling van MARPLE wordt gebruikt om de 'warming up' periode te modelleren, d.w.z. om het netwerk te vullen, en na afloop zijn 30 minuten 'cooling down' (met zeer beperkte vraag) gesimuleerd opdat het verkeer haar bestemming bereikt. De herkomst-bestemmingsmatrix is weergegeven in Tabel 1.

HB / Periode	1	2	3	4	5
O_1-D_1	1600	3000	3100	2900	2000
O_1-D_2	800	1300	1300	1000	1000
O_1-D_3	300	400	500	500	400
O_1-D_4	300	400	500	500	400
O_2-D_1	300	500	500	500	500
O_3-D_1	300	500	500	500	500

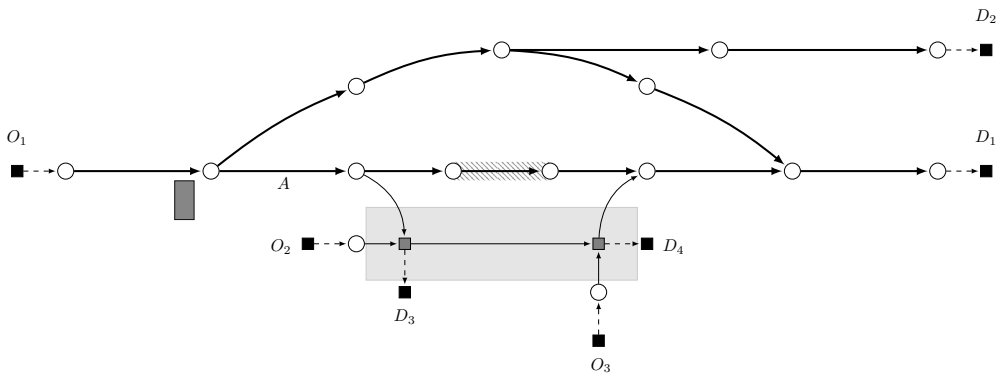
Tabel 1: Herkomst-bestemmingsmatrix

Voor het hoofdwegennet is aangenomen dat de capaciteit 2100 vtg/uur per rijstrook is. De meeste wegen hebben twee rijstroken. Het segment voor het eerste divergentiepunt bestaat uit drie rijstroken. Het deel na het tweede divergentiepunt voor de route bovenlangs, d.w.z. richting D_1, bestaat uit één rijstrook. De gemodelleerde maximumsnelheid op het hoofdwegennet is 100 km/h. De af- en toerit bestaan uit twee rijstroken met een maximum snelheid van 50km/h en een capaciteit van 1400 vtg/uur per rijstrook. Het segment dat de twee VRI's verbindt bestaat ook uit twee rijstroken. De overige wegen hebben één rijstrook.

De capaciteitsreductie is het gevolg van geplande werkzaamheden. Waar initieel twee stroken beschikbaar waren, wordt aangenomen dat door werkzaamheden één strook beschikbaar is voor de gehele gesimuleerde periode. Hierdoor neemt de capaciteit af tot 45% van de oorspronkelijk 4200 vtg/uur, en is aangenomen dat de maximumsnelheid afneemt tot 50 km/h.

De beide wegbeheerders kunnen elk maatregelen inzetten om de situatie te verbeteren.

- De gemeente heeft het beheer over twee VRI's met elk twee signaalgroepen. De linker VRI in Figuur 1 kan onder meer worden gebruikt door de gemeente om 'afritdosering' toe te passen. Dit geeft overigens een aardig beeld van de werkelijkheid waarin deze VRI een 'bottleneck' is voor verkeer wat van de A35 afkomt en Almelo inrijdt. Met beide VRI's is de gemeente in staat de doorstroming op de omleidingsroute 'door de stad' te beïnvloeden. Het doel van



Figuur 1: Illustratie gesimuleerd netwerk

de gemeente is om de *total time spent* (TTS, totaal gespendeerde tijd) in hun subnetwerk te minimaliseren.

- Rijkswaterstaat heeft het beheer over een DRIP op de A35 om daarmee verkeer te kunnen verleiden de route 'bovenlangs', over het hoofdwegennet rechtdoor of via het onderliggend wegennet te nemen. Zoals aangegeven wordt hier normaliter niet expliciet een routeadvies gegeven, maar door informatie te verstrekken over reistijden wordt dit impliciet toch wel gedaan. Als gevolg is gemodelleerd dat er wel een expliciet routeadvies wordt gegeven door middel van de DRIP. Aangezien de suggestie wordt gecommuniceerd via een paneel is deze routesuggestie niet gepersonaliseerd, d.w.z. er wordt één route gesuggereerd aan alle weggebruikers die dit punt passeren. Er is aangenomen dat het doel van Rijkswaterstaat is om de TTS in hun subnetwerk te minimaliseren.

Naast wegbeheerders gaan we ook uit van twee serviceproviders (NSP1 en NSP2), elk met een eigen penetratiegraad. In beginsel krijgen hun gebruikers advies over de snelste route. De kwaliteit van dit advies hangt mede af van de penetratiegraad. Immers, elke serviceprovider maakt gebruik van de door henzelf ingewonnen gegevens. En de penetratiegraad bepaalt daarmee hoe accuraat het advies is en ook hoeveel weggebruikers daadwerkelijk het gegeven advies gaan opvolgen (zie Hoofdstuk 4). Omdat het advies is gebaseerd op actuele ingewonnen gegevens, waarmee instantane reistijden kunnen worden afgeleid, kan bij hoge penetratie het advies uiteindelijk niet goed blijken te zijn. Ook dit is meegenomen in dit onderdeel.

5.2 Beoordelingskader

Met behulp van dynamisch verkeersmodel MARPLE kan de verkeersafwikkeling voor alle scenario's worden bepaald. Voor de evaluatie van de effecten van verschillende scenario's is een beoordelingskader nodig dat bestaat uit indicatoren die gerelateerd zijn aan de (doelen van de) verschillende actoren, te weten

- Impact voor wegbeheerders: TTS op (sub)netwerk waar de betreffende wegbeheerder verantwoordelijk voor is.
- Gebruikersimpact: distributie in reistijden voor weggebruikers per gebruikerstype.
- Impact voor serviceproviders: distributie in reistijden van weggebruikers per partij, waarbij het mogelijk wordt 'winnaars' en 'verliezers' te identificeren.

Daarnaast wordt de TTS op het hele netwerk bepaald voor een analyse in hoeverre het systeem optimum wordt benaderd. De totale reisafstand wordt gebruikt als indicator voor emissies. Resultaten worden vergeleken met de indicatorwaarden voor het (deterministische) gebruikersevenwicht in een situatie met een capaciteitsbeperking, d.w.z. tijdens werk in uitvoering (dit wordt aangeduid met DUE-WiU). In gebruikersevenwicht wordt uitgegaan van een scenario waarin de DRIP is uitgeschakeld, en de VRI's voertuig- of verkeersafhankelijk zijn geregeld. Resultaten worden

verder geduid aan de hand van (gemiddelde) snelheden en vertragingen op specifieke delen van het netwerk. Daarnaast worden ook de waarden van de indicatoren weergegeven voor het stochastische gebruikersevenwicht voor het scenario zonder capaciteitsbeperking (het reguliere scenario, aangeduid met SUE-Reg).

5.3 Scenario's

In de verschillende scenario's wordt als uitgangspunt genomen dat alle weggebruikers toegang hebben tot informatie (zie Hoofdstuk 3). Voor deze simulatiestudie wordt aangenomen dat gebruikers exclusief gebruik maken van één informatiebron. Dat wil zeggen: een deel van de gebruikers gebruikt een navigatiesysteem, en het overige deel baseert hun routekeuze op basis van de informatie zoals gecommuniceerd door de DRIP. Er wordt uitgegaan van twee verschillende navigatie serviceproviders (NSP1 en NSP2), waardoor er in wezen drie informatiebronnen zijn. Al deze informatiebronnen communiceren enkel een routeadvies. Daarnaast kan de lokale wegbeheerder de groentijden bepalen (periode afhankelijk), waarbij de minimale groentijd 7 seconden is, en de maximum groentijd 20 seconden.

Voor de verschillende scenario's wordt aangenomen dat een vast percentage van de weggebruikers de DRIP als informatiebron gebruikt. De overige weggebruikers ontvangen advies via het navigatiesysteem van NSP1 of NSP2. In de resultaten wordt het aandeel NSP1 gebruikers weergegeven waarbij dus de overige weggebruikers die een navigatiesysteem gebruiken, gebruikmaken van NSP2. Deze serviceproviders acteren in wezen hetzelfde, zij hebben immers dezelfde doelstelling. Echter door het verschil in penetratiegraad hebben zij potentieel andere informatie tot hun beschikking. Tabel 2 geeft een overzicht van de gesimuleerde gebruikersgroepen en de bijbehorende penetratiegraden. Deze scenario's zijn gesimuleerd voor elk spel.

Scenario	**DRIP**	**NSP1**	**NSP2**
1	10%	1 %	89 %
2	10%	10%	70 %
3	10%	20%	60 %
4	10%	30%	50 %
5	10%	40%	50 %
6	10%	50%	40 %
7	10%	60%	30 %
8	10%	70%	20 %
9	10%	80%	10 %
10	10%	89%	1 %

Tabel 2: Overzicht gesimuleerde scenario's gebruikersgroepen

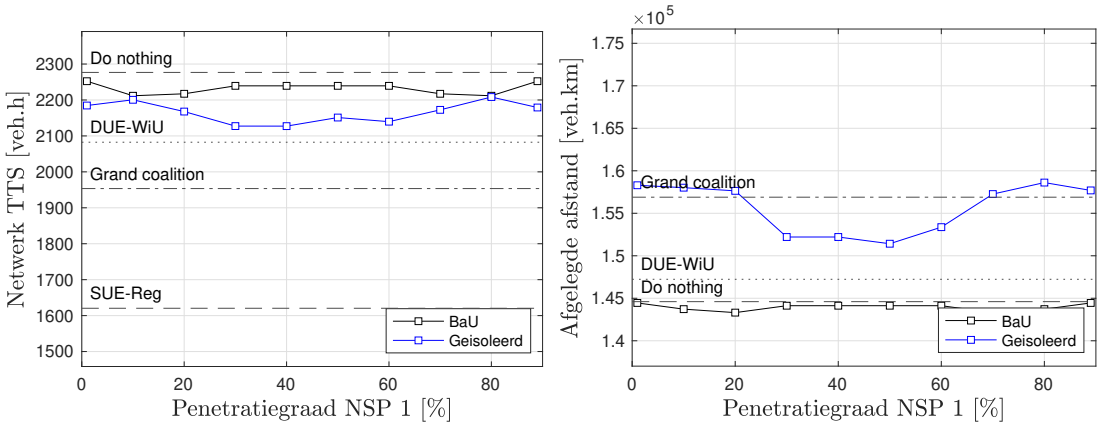
Initieel wordt aangenomen dat alle gebruikers informatie en advies tot zich nemen, en op basis daarvan hun routekeuze bepalen. Voor de gevoeligheidsanalyse is aangenomen dat een deel (25%) van de gebruikers wel advies tot zich neemt maar het negeert en zich gedraagt als gewoontegebruiker. Partijen hebben kennis van hoe groot dit aandeel is.

6 Resultaten

Het beoordelingskader zoals geïntroduceerd in het vorige hoofdstuk wordt gebruikt om de verschillende scenario's te kunnen analyseren en vergelijken.

Netwerkindicatoren

Figuur 2a vergelijkt de TTS voor het gehele netwerk voor het business-as-usual (BaU) scenario en het scenario waarin services geïsoleerd worden ingezet naar aanleiding van de capaciteitsreductie veroorzaakt door wegwerkzaamheden. Ter vergelijking wordt de prestatie indicator ook weergegeven voor het do-nothing, het gebruikersevenwicht scenario zonder capaciteitsbeperking (SUE-Reg) en het gebruikersevenwicht tijdens werk in uitvoering (DUE-WiU). Hieruit blijkt dat ten opzichte van een do-nothing scenario de verkeerssituatie significant kan worden verbeterd door de inzet van verkeersmanagementdiensten. In het algemeen is het voor het netwerk voordelig dat er in ieder geval deels rekening wordt gehouden met acties van andere partijen en de impact van het eigen handelen (geïsoleerd). Het alternerende effect is mogelijk te verklaren door de generieke informatie aan weggebruikers die de DRIP gebruiken in hun routekeuze. In deze situaties kan de netwerkprestatie met name worden verbeterd door verkeer naar het onderliggend wegennet en de route bovenlangs te leiden (zie Figuur 2b).



(a) TTS Netwerk

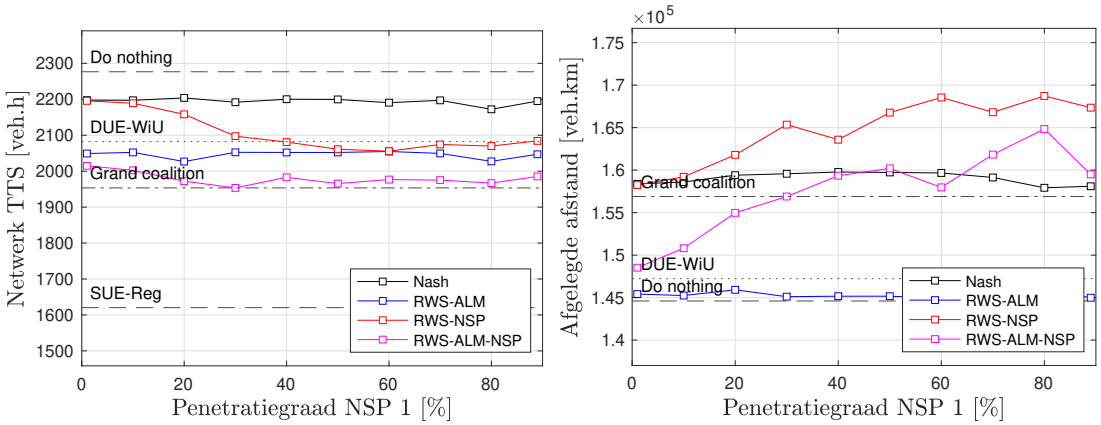
(b) Totaal afgelegde afstand

Figuur 2: TTS netwerk en totaal afgelegde afstand voor scenario's BaU en geïsoleerd

In Figuur 3a wordt de TTS voor het hele netwerk voor de verschillende gesimuleerde samenwerkingscenario's weergegeven. Wanneer er niet-coöperatief wordt gehandeld (Nash evenwicht) maakt een deel van de reizigers (10%) gebruik van generieke informatie van de DRIP om hun route te bepalen. Deze DRIP suggereert in wezen een route waarbij beoogd wordt om de TTS op het hoofdwegennet te reduceren. Tegelijkertijd zet de lokale wegbeheerder maatregelen in om de TTS op het onderliggend wegennet te verbeteren. Dit kan met elkaar conflicteren. De TTS op het netwerk voor het Nash evenwicht laat een verbetering zien ten opzichte van het do nothing scenario (-3%), maar de reductie vergeleken met het BaU-scenario is marginaal.

Ten opzichte van het Nash evenwicht hebben alle samenwerkingsvormen waarbij er een coalitie wordt gevormd een positief effect op de TTS. Zelfs een samenwerking tussen alleen de beide wegbeheerders (RWS-Alm) blijkt al effectief in het reduceren van TTS op het netwerk. In beide scenario's hebben de penetratiegraden van de verschillende serviceproviders geen effect op de verkeerssituatie. Gegeven de keuzes van de wegbeheerders wordt aan de hand van gepersonaliseerd reisadvies immers een gebruikersevenwicht bewerkstelligd, waarbij beide serviceproviders niet alleen dezelfde doelstelling hebben maar ook toegang hebben tot dezelfde informatie. Wanneer er wordt gekeken naar de TTS voor dit netwerk is met name een samenwerking tussen de nationale wegbeheerder en een serviceprovider (RWS-NSP en RWS-ALM-NSP) effectief wanneer de samenwerkende serviceprovider een hoge penetratiegraad heeft. Ten opzichte van het do-nothing scenario

kan een 14% verbetering in TTS worden bewerkstelligd door samenwerking tussen partijen die zich bezighouden met verkeersmanagement.



(a) TTS Netwerk

(b) Totaal afgelegde afstand

Figuur 3: TTS netwerk en totaal afgelegde afstand voor verschillende coalities

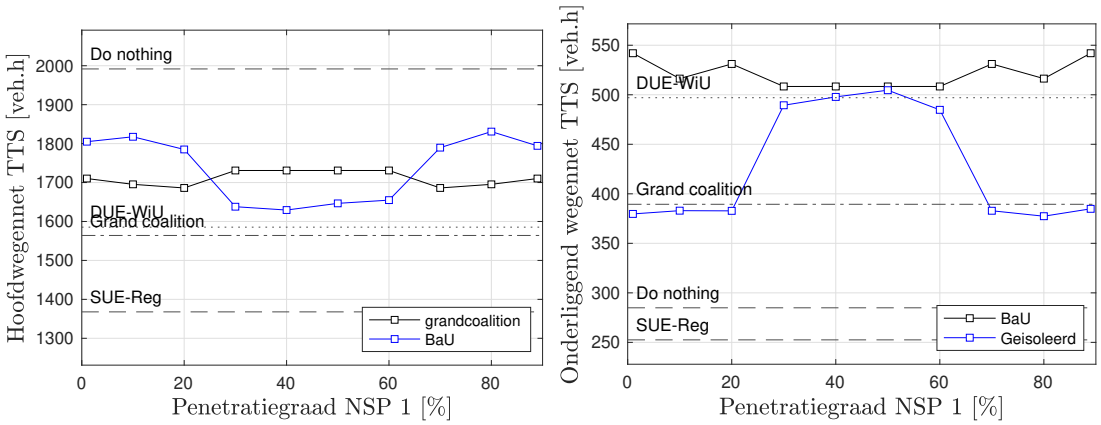
Vergeleken met de reguliere (en het do-nothing) situatie moeten veelal wel langere routes worden afgelegd om de situatie in het netwerk te verbeteren. Figuur 3b geeft weer dat met name bij publiek-private samenwerkingsmodellen de gemiddelde afgelegde afstand (significant) toeneemt. Hierbij moet worden opgemerkt dat in een gebruikersevenwicht relatief weinig verkeer gebruikmaakt van de route bovenlangs. Indien wordt aangenomen dat afgelegde afstand een indicator is voor de totale uitstoot van emissies biedt het scenario waarbij Rijkswaterstaat en Almelo samenwerken een goede balans tussen emissies en efficiëntie - in ieder geval voor het gemodelleerde netwerk met de bijbehorende verkeersvraag. Ten opzichte van het do-nothing scenario neemt de afgelegde afstand toe met ongeveer 0,5%, terwijl de TTS op het netwerk met 10% wordt gereduceerd.

Impact voor wegbeheerders

Figuur 4a geeft de TTS op het hoofdwegennet weer voor het business-as-usual scenario en wanneer services worden ingezet waarbij er geïsoleerd wordt gehandeld. In het laatste scenario wordt er dus gereageerd op het handelen van anderen maar geanticipeerd op de invloed van het eigen handelen op de (toekomstige) verkeerssituatie. De figuur laat zien dat de penetratiegraad van navigatie serviceproviders relatief weinig impact heeft op de TTS voor de subnetwerken voor het business-as-usual scenario. Wanneer er geanticipeerd wordt op het eigen handelen, en wanneer de verkeerssituatie in grote mate kan worden beïnvloed (d.w.z., wanneer de penetratiegraad voor NSP 1 dan wel NSP 2 hoog is), is de resulterende verkeerssituatie niet noodzakelijkerwijs een gebruikersevenwicht - terwijl is aangenomen dat het bereiken van een dergelijk evenwicht wel het doel is van serviceproviders. Dit kan worden verklaard door de conflicterende doelstelling van wegbeheerders (minimaliseren van TTS op het subnetwerk).

In Figuur 5a wordt de TTS op het hoofdwegennet weergegeven voor de verschillende gesimuleerde coalities, waarbij wordt aangenomen dat 10% van de gebruikers de informatie op de DRIP gebruikt voor hun routekeuze, en er gevarieerd is in de penetratiegraad van NSP 1. Zoals kon worden verwacht beïnvloedt deze penetratiegraad de prestatie-indicator niet in het Nash scenario, in een situatie met een coalitie bestaande uit de wegbeheerders en wanneer er geen coalitie wordt gevormd.

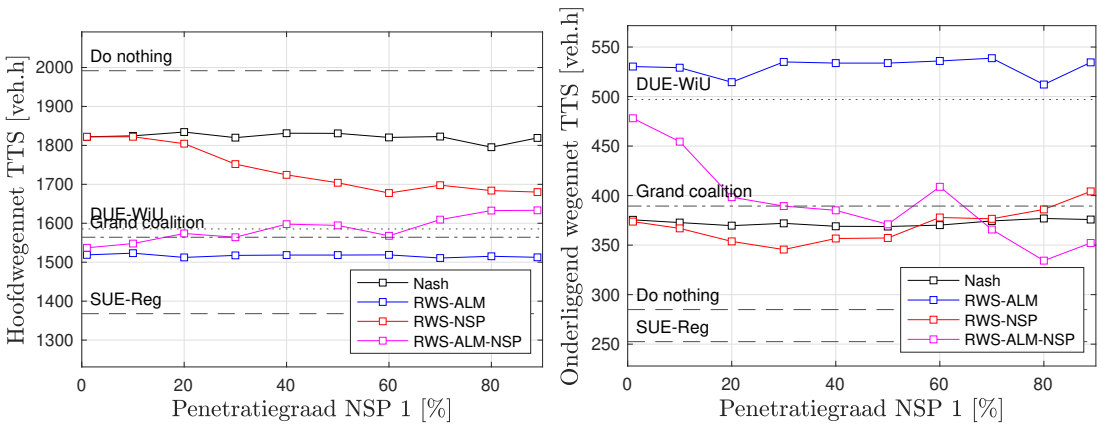
In het do-nothing scenario maakt relatief weinig verkeer gebruik van het onderliggend wegennet (zie Figuur 5b). De verkeersmanagementmaatregelen trachten een deel van het verkeer naar het onderliggend wegennet te sturen. In een Nash scenario probeert de lokale wegbeheerder tegelijkertijd de TTS op dit wegennet te minimaliseren. Echter, de bijdrage van de TTS op het onderliggend wegennet aan de TTS voor het hele netwerk is relatief beperkt, waardoor er in een situatie waarin de TTS voor het hele netwerk wordt geminimaliseerd relatief veel verkeer via de route bovenlangs (hoofdwegennet) wordt gestuurd.



(a) TTS Hoofdwegennet (b) TTS Onderliggend wegennet

Figuur 4: TTS hoofdwegennet en onderliggend wegennet voor scenario's BaU en geïsoleerd

In het geval Rijkswaterstaat en Almelo een coalitie vormen (RWS-Alm), wordt de TTS op het hoofdwegennet met ongeveer 24% gereduceerd vergeleken met een 'do nothing' scenario. Vergeleken met dit scenario en het gebruikersevenwicht neemt de TTS op het onderliggend wegennet echter toe. Hierbij is het voor de gemeente voordeliger om geen coalitie te vormen, of alleen samen te werken met Rijkswaterstaat als ook een navigatie serviceprovider deelneemt aan de samenwerking. Dit komt omdat bij het verminderen van de TTS in het hele netwerk verkeer potentieel naar Almelo wordt geleid, daarmee kan de TTS op het hoofdwegennet substantieel worden gereduceerd ten koste van een toename in TTS op het onderliggende wegennet. Een dergelijke wisselwerking is ook zichtbaar in Figuur 5a voor een coalitie van Rijkswaterstaat, Almelo en een navigatie serviceprovider. Een stijgende trend in de TTS op het hoofdwegennet kan worden waargenomen wanneer de penetratiegraad van NSP1 groter wordt, terwijl de TTS op het onderliggend wegennet afneemt.



(a) TTS Hoofdwegennet (b) TTS Onderliggend wegennet

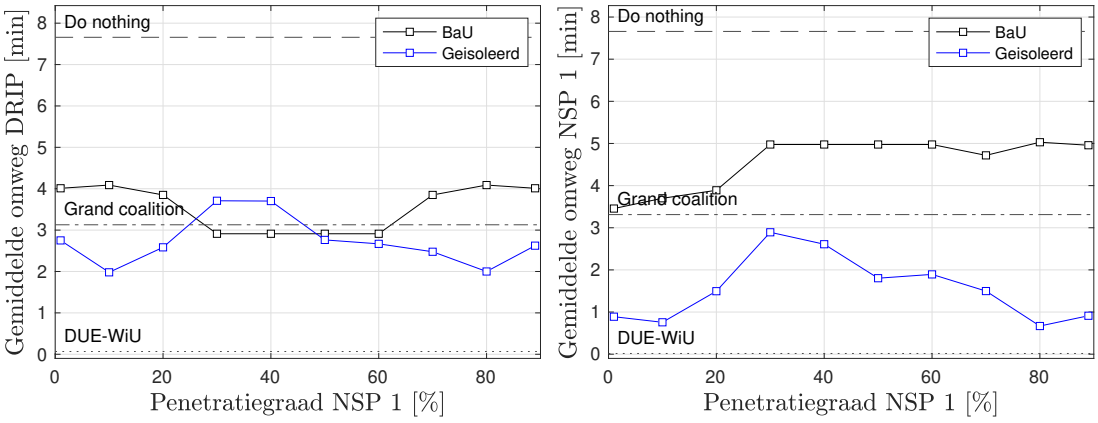
Figuur 5: TTS hoofdwegennet en onderliggend wegennet voor verschillende coalities

Als Rijkswaterstaat gaat samenwerken met NSP1 is er competitie tussen deze coalitie en Almelo. Door de samenwerking wordt een deel van het verkeer gestuurd naar het onderliggend wegennet (t.o.v. do nothing), aangezien het doel is om TTS op het hoofdwegennet te minimaliseren. Hoe groter het deel van de weggebruikers dat 'gestuurd' kan worden (d.w.z. hoe hoger de penetratiegraad), hoe te sterker de effecten. De TTS op het hoofdwegennet kan door de inzet van DRIP en de navigatiedienst worden gereduceerd met bijna 16% in vergelijking met 'do nothing'.

Impact voor weggebruikers en serviceproviders

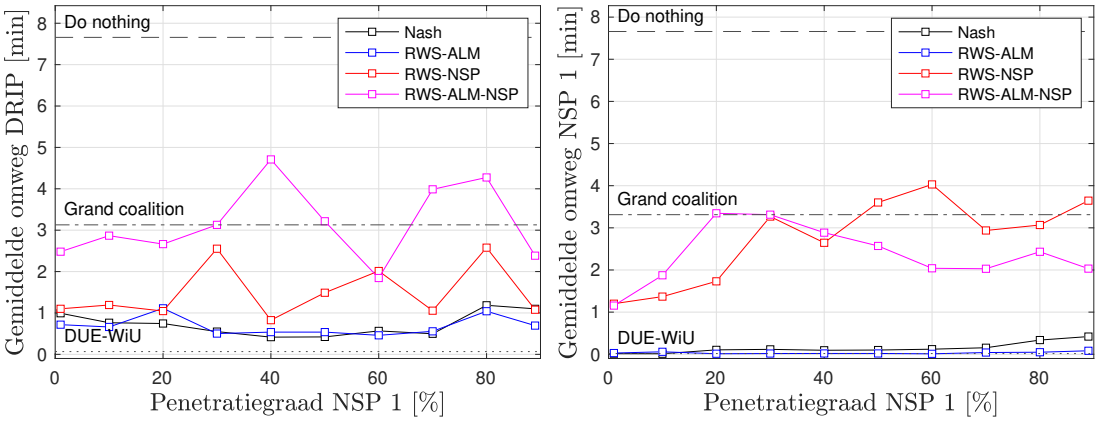
Zonder de inzet van verkeersmanagementdiensten nemen we aan dat het do-nothing scenario wordt gerealiseerd, waarbij reizigers dus hun gebruikelijke of oorspronkelijke route volgen. Als gevolg van de reductie in capaciteit zou dit betekenen dat voor een groot deel van de gebruikers de reistijd oploopt, en hun gebruikelijke route gemiddeld ruim 7 minuten langer duurt dan de snelste route.

Waar Rijkswaterstaat als doel heeft om een (sub)netwerkindicator te optimaliseren, is bekend dat dit kan conflicteren met de doelstelling voor individuen of navigatie serviceproviders. Dit betekent dat de wegbeheerder potentieel weggebruikers probeert te verleiden een route te kiezen die niet het snelste is. Opvolgen van een dergelijk advies zorgt potentieel dus voor extra reistijd vergeleken met andere weggebruikers met dezelfde herkomst en bestemming. Dit effect zien we terug in Figuur 6a. Hier wordt de extra reistijd weergegeven voor weggebruikers die de geadviseerde route nemen zoals gecommuniceerd via de DRIP. Wanneer de geadviseerde route wordt gebaseerd op instantane reistijden (BaU), is kan de extra reistijd oplopen tot ongeveer 4 minuten. Wanneer wordt geanticipeerd op het eigen handelen, kan deze extra reistijd worden beperkt. In de gesimuleerde huidige situatie op basis van gerealiseerde tijden wordt er ook door serviceproviders nog immer een route aangeboden die niet de snelste is (Figuur 6b). Dit geldt ook voor een scenario waarbij er geanticipeerd wordt op het eigen handelen, al is de gerealiseerde extra reistijd in dat geval significant korter.



(a) Extra reistijd advies DRIP (b) Extra reistijd NSP

Figuur 6: Gemiddelde extra reistijd ten opzichte van snelste route voor verschillende gebruikersgroepen - scenario's BaU en geïsoleerd

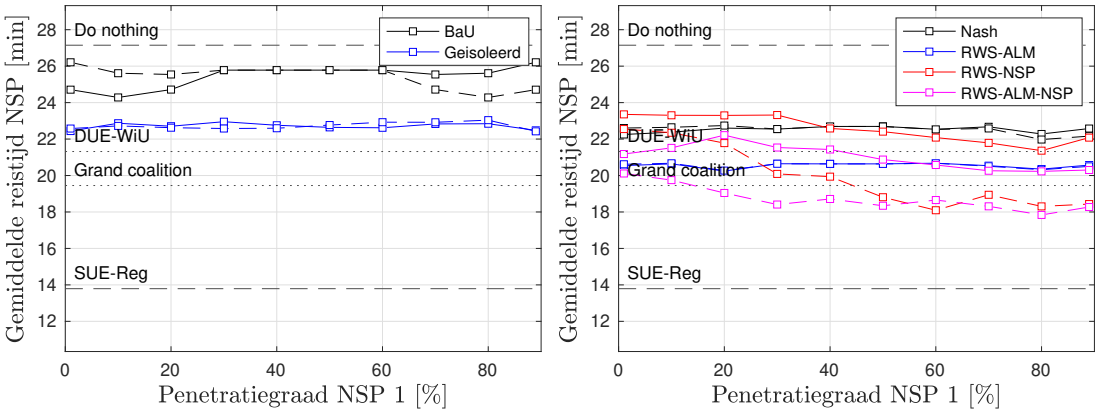


(a) Extra reistijd advies DRIP (b) Extra reistijd NSP

Figuur 7: Gemiddelde extra reistijd ten opzichte van snelste route voor verschillende gebruikersgroepen

Het effect van anticiperen op het handelen van alle partijen is te zien in Figuur 7a, waar de gemiddelde omweg (in minuten) voor alle gebruikers die een advies op de DRIP volgen wordt weergegeven. En dit kan zorgen voor een 25% langere reistijd dan die van de snelste route. Deze bevindingen suggereren dat het verstandig is om enkel beperkt langere routes te adviseren om daarmee de acceptatie van dergelijke services te vergroten (Eikenbroek et al., 2022).

De navigatie serviceprovider geeft gepersonaliseerd routeadvies. In geval de serviceprovider geen onderdeel is van een coalitie en een gebruiker het advies opvolgt (of het advies overeenkomt met de gebruikelijke route), blijkt uit Figuur 7b dat deze gebruiker dan geen extra reistijd heeft ten opzichte van de snelste route. Wanneer de serviceprovider bereid is om samen te werken met een of meerdere wegbeheerders, en daarbij de doelfunctie van de wegbeheerder(s) overneemt, gaat dit potentieel ten koste van de reistijd van gebruikers. Figuur 7b laat zien dat gemiddeld gezien het opvolgen van gepersonaliseerd routeadvies ten behoeve van een (sub)systeem leidt tot een extra reistijd van ongeveer 1 tot 4 minuten, afhankelijk van het scenario. Dit komt overeen met maximaal ongeveer 15% extra reistijd. Aangezien NSP 2 in deze coalities niet samenwerkt met de wegbeheerder, worden gebruikers van deze dienst gerouteerd op de snelste route. Zij hebben dus geen extra reistijd ten opzichte van andere weggebruikers met dezelfde herkomst-bestemmingsrelatie.



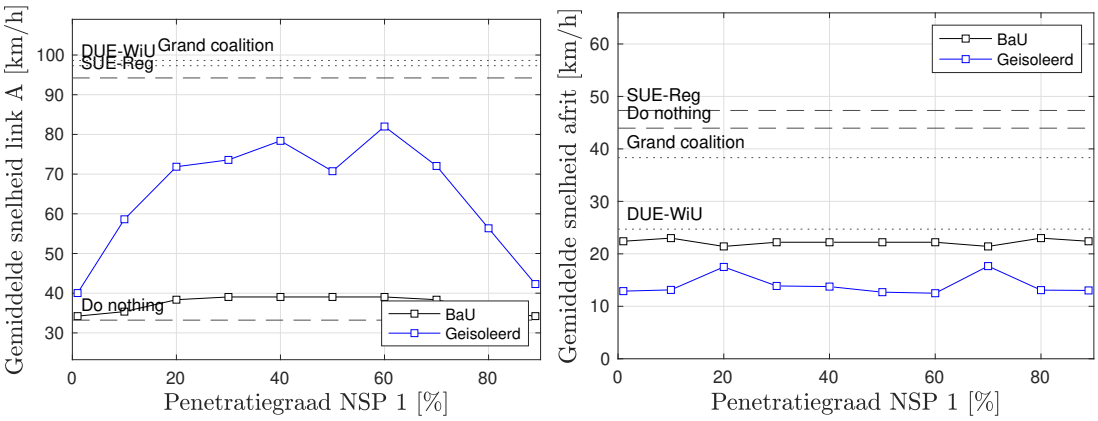
Figuur 8: Gemiddelde reistijd gebruikers navigatiedienst

Dit verschil wordt ook duidelijk wanneer er naar de gemiddelde reistijd voor de gebruikers voor de verschillende navigatiediensten wordt gekeken. Figuur 8 geeft de reistijd voor gebruikers van NSP 1 (doorgetrokken lijn) en de gemiddelde tijd voor gebruikers van NSP 2 (onderbroken lijn) voor elk gesimuleerde scenario. Wanneer er door serviceproviders wordt geanticipeerd in plaats van gereageerd, neemt de gerealiseerde reistijd van gebruikers significant af (vergelijk BaU met geisoleerd scenario). Opmerkelijk is dat de penetratiegraad slechts een beperkte invloed heeft in het geisoleerde scenario. Uit Figuur 8 blijkt verder dat een samenwerkingsscenario tussen wegbeheerders voordeel oplevert voor de gebruikers van navigatiediensten. In vergelijking met een gebruikersevenwicht is de reistijdreductie gemiddeld ongeveer 1 minuut, en in vergelijking met het business-us-usual scenario tot wel 5 minuten.

Er ontstaan verschillen in reistijden van gebruikers in het geval een navigatie serviceprovider gaat samenwerken met één of meerdere wegbeheerders. Wanneer Rijkswaterstaat samenwerkt met een serviceprovider kan de TTS op het hoofdwegennet worden verbeterd (RWS-NSP), maar dit vraagt een offer van de gebruikers van de navigatiedienst. Gebruikers accepteren niet additionele reistijd ten opzichte van andere weggebruikers (*intra-state* verschil), zij zijn potentieel ook nog eens slechter af ten opzichte van een situatie in bijvoorbeeld een Nash evenwicht (*inter-state* verschil). Dit houdt in dat in voor de beschouwde casus een samenwerkingsmodel waarbij een navigatie serviceprovider gaat samenwerken met een wegbeheerder met name voordelig is (in termen van intra- en inter-state reistijdverschilllen) voor de serviceprovider die juist niet deelneemt aan de samenwerking. Wanneer er enkel naar reistijden wordt gekeken, is het op basis van deze resultaten vrij onwaarschijnlijk dat een serviceprovider gaat meewerken in welke coalitie dan ook.

Impact op verkeerssituatie

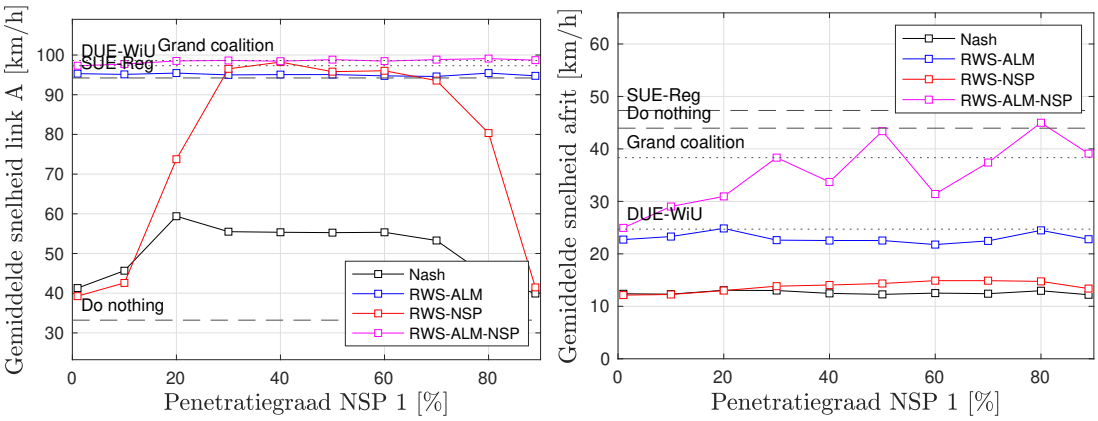
Om de resultaten te duiden wordt er gekeken naar de snelheden op twee belangrijke wegvakken in het netwerk. Figuur 9a geeft de gemiddelde snelheid (over de gehele simulatieperiode) weer voor het wegvak net bovenstrooms van de afrit (link A, zie Figuur 1). De snelheid op deze link geeft een indicatie van de mate van terugslag als gevolg van de capaciteitsreductie op de snelweg.. De gemiddelde snelheid op de afrit wordt weergegeven in Figuur 9b. In een do-nothing scenario wordt de link bijna niet gebruikt (en de gemiddelde snelheid ligt dicht bij de maximumsnelheid). Tegelijkertijd treedt in dit geval terugslag op tot voorbij het divergentiepunt: de gemiddelde snelheid op link A ligt ver onder de 50 km/h, zie Figuur 9a. Deze terugslag treedt niet op in een gebruikersevenwicht. In een BaU scenario is er hier wel sprake van congestievorming, waarbij een deel van het verkeer via Almelo wordt gestuurd. In het geïsoleerde scenario is er (vrijwel) geen sprake van terugslag, maar de situatie op de afrit verslechtert.



(a) Gemiddelde snelheid link A (b) Gemiddelde snelheid afrit

Figuur 9: Gemiddelde snelheden voor scenario's BaU en geïsoleerd

De terugslag kan worden voorkomen door meer verkeer naar het onderliggend wegennet te leiden, waardoor de snelheid op de afrit afneemt. Dit is met name zichtbaar in een situatie waarbij er niet wordt samengewerkt, en wanneer Almelo geen onderdeel uitmaakt van een coalitie (zie Figuur 10a en Figuur 10b). Echter, wanneer gezamenlijk wordt gehandeld kan en de terugslag worden voorkomen, en congestievorming op de afrit worden beperkt. In het geval van een 'grand coalition' ligt de gemiddelde snelheid zowel op de afrit als op link A dicht bij de maximumsnelheid.

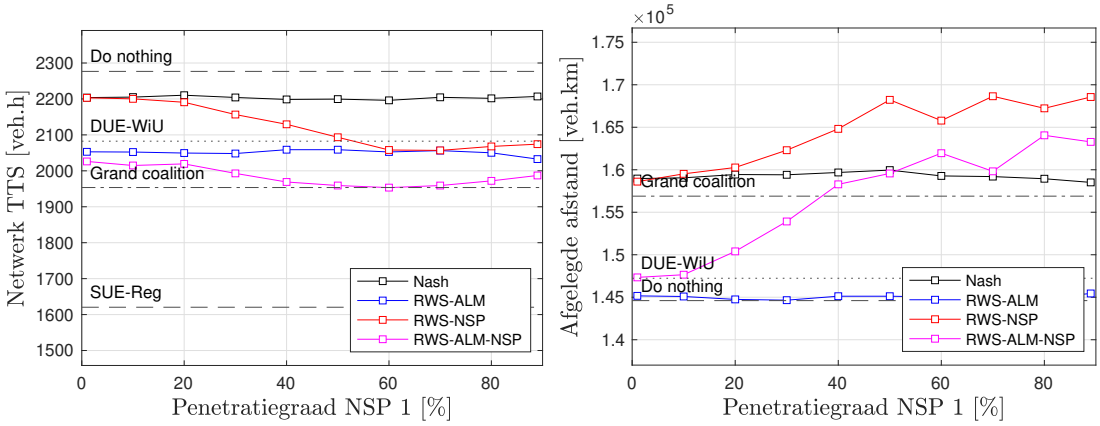


(a) Gemiddelde snelheid link A (b) Gemiddelde snelheid afrit

Figuur 10: Gemiddelde snelheden voor gesimuleerde coalities

6.1 Gevoeligheidsanalyse

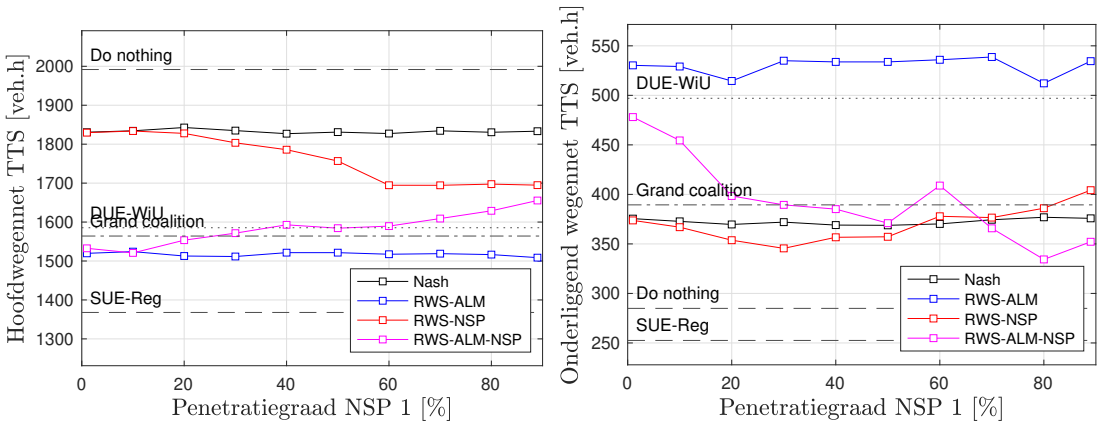
In vorige sectie is aangenomen dat alle gebruikers routeinformatie en -advies gebruiken in hun routekeuze. Zoals aangegeven in Hoofdstuk 3, is het waarschijnlijk dat een deel van de weggebruikers het advies niet opvolgt. Er is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd, waarbij is aangenomen dat 25% het advies weliswaar tot zich neemt. maar dit niet gebruikt en zich dus gedraagt als gewoontegebruiker (zie bijv. Taale, 2020). Overigens kan in dat geval nog steeds dezelfde route als in het advies worden gekozen.



(a) TTS Netwerk (b) Totaal afgelegde afstand

Figuur 11: TTS netwerk en totaal afgelegde afstand voor verschillende coalities, met 25% gewoontegebruiker

Uitkomsten laten zien dat wanneer een kwart van de weggebruikers het advies negeert, dit relatief weinig effect heeft op de prestatie indicatoren. Bijvoorbeeld: de TTS op het netwerk voor de verschillende scenario's wanneer 75% advies opvolgt, weergegeven in Figuur 11a, is vergelijkbaar met de resultaten van Figuur 3a. Ook de totaal afgelegde afstand is vergelijkbaar, zie Figuur 12b en Figuur 5b. Een mogelijke verklaring is dat een deel van de gebruikers wordt geadviseerd hun gebruikelijke route te volgen. Enkel bij een samenwerking tussen Rijkswaterstaat en een navigatieserviceprovider (RWS-NSP) waarbij de penetratiegraad voor NSP1 onder de 60% ligt, is er een substantieel verschil in TTS op het netwerk zichtbaar. Ditzelfde geldt voor de TTS op het hoofdwegennet (Figuur 12a) en het onderliggend wegennet (Figuur 12b).



(a) TTS Hoofdwegennet (b) TTS Onderliggend wegennet

Figuur 12: TTS hoofdwegennet en onderliggend wegennet voor verschillende coalities, met 25% gewoontegebruiker

7 Synthese

In dit hoofdstuk wordt een synthese gepresenteerd van de meerwaarde van proactieve en samenhangende inzet van verkeersmanagementdiensten. Voor de simulatiestudie is een aantal scenario's gedefinieerd voor wat betreft de samenwerking en inzet van verkeersmanagementsdiensten. Hierbij is uitgegaan van een situatie met twee wegbeheerders (een nationale en lokale wegbeheerder) en twee serviceproviders die een navigatiedienst aanbieden. Wegbeheerders trachten de TTS op het netwerk waar zij verantwoordelijk voor zijn te minimaliseren, terwijl navigatie serviceproviders de op dat moment snelste route adviseren aan gebruikers.

7.1 Bevindingen

Anticiperende in plaats van reactieve besluitvorming

Een business-as-usual scenario is gemodelleerd om een inschatting te krijgen van de verkeerseffecten van het inzetten van verkeersmanagementdiensten volgens de huidige praktijk. Serviceproviders en wegbeheerders zetten maatregelen reactief in om hun eigen doelen te behalen, en houden daarbij vrijwel geen rekening met (i) de invloed van hun eigen handelen op de toekomstige verkeerssituatie, en (ii) het handelen van andere partijen, en de invloed daarvan op de verkeerssituatie (en daarmee op het handelen van de partijen). Een vergelijking tussen dit business-as-usual scenario met de verschillende scenario's waarbij er wel pro-actief wordt gehandeld laat zien dat dat in de meeste situaties voor partijen voordeel oplevert. De resultaten van de simulaties geven weer dat zelfs als er een relatief simpele aanname wordt gedaan over het (toekomstig) handelen van andere partijen, er een beter beeld ontstaat van de toekomstige verkeerssituatie, en daardoor de services beter kunnen worden ingezet. Bijvoorbeeld: Figuur 6b laat zien dat navigatie serviceproviders bijvoorbeeld een route adviseren met beperkte extra reistijd ten opzichte van de snelste route. Wanneer er reactief wordt gehandeld, is de gerealiseerde reistijd significant langer dan de snelste route. De reistijd op de gesuggereerde route is ook korter, volgens Figuur 8 kan dit verschil oplopen tot ongeveer 3 minuten. De effecten voor de wegbeheerder laten een wat diffuser beeld zien, maar over het algemeen neemt de TTS af voor wegbeheerders die anticiperend in plaats van reactief acteren.

De uitkomst van het niet-coöperatief maar anticiperend handelen van partijen is gemodelleerd aan de hand van een Nash evenwicht. Hier wordt aangenomen dat serviceproviders en wegbeheerders kennis hebben van de strategie en doelfuncties van andere spelers. Er wordt dus pro-actief gehandeld, d.w.z. er wordt rekening gehouden met het handelen van spelers en de invloed op de verkeerssituatie. Het is een open vraag of een dergelijk Nash evenwicht bestaat, en hoe dit evenwicht kan worden bepaald. Op basis van een schatting van dit evenwicht blijkt dat er potentieel meerdere stabiele uitkomsten bestaan. Een evenwicht houdt in dat serviceproviders de snelste route kunnen aanbieden aan gebruikers, maar voor het beschouwde netwerk is de reistijd op deze route in beginsel niet (veel) beter in vergelijking met een situatie waarin er enkel wordt geanticipeerd op het eigen handelen. Een analyse van dit Nash evenwicht - of andere stabiele uitkomsten van niet-coöperatief maar anticiperend handelen van partijen - is een onderwerp voor vervolgonderzoek.

Samenwerkingsmodellen

Er is een reeks samenwerkingsvormen gemodelleerd. We veronderstellen dat het gezamenlijke doel bij samenwerking het minimaliseren van de TTS is. Wanneer een serviceprovider toetreedt tot een samenwerkingsverband geeft deze gepersonaliseerde routeadviezen die daarom ook bijdragen aan dit gezamenlijke doel. De simulaties laten zien dat samenwerking een duidelijk positief effect heeft. De samenwerking tussen wegbeheerders (en competitie met en tussen serviceproviders) kan al een substantiële verbetering in TTS opleveren. In de gesimuleerde omgeving voorkomt dit ook nog terugslag van congestie, waarmee met name de prestatie van het hoofdwegennet wordt verbeterd. Dit houdt niet automatisch in dat de verkeerssituatie voor de lokale wegbeheerder beter wordt. Dat wil zeggen: als de verandering in TTS op het onderliggend wegennet een indicatie geeft van de bereidwilligheid voor samenwerking van een lokale wegbeheerder, dan is er voor deze wegbeheerder niet echt een reden om te gaan samenwerken. Omdat het doel is om TTS op het hele netwerk te minimaliseren kunnen we dit voorbeeld verklaren doordat kennelijk de verslechtering op het onderliggende wordt gecompenseerd door een verbetering van de situatie op het hoofdwegennet.

Dit zou dan ook betekenen dat er in zo'n geval compensatie tussen wegbeheerders zou moeten plaatsvinden. In de praktijk kan een vergelijkbare dynamiek worden verwacht, waar door een capaciteitsreductie op het hoofdwegennet verkeer naar andere delen van het netwerk wordt gestuurd of verleid, wat ten koste gaat van bijvoorbeeld de TTS op dat deel. Onze bevindingen gelden voor een niet-regulieren situatie. Eerder is in Taale (2008) een reguliere situatie gesimuleerd waarbij twee wegbeheerders samenwerken, en waar door deze samenwerking de vertraging op zowel het hoofdwegen- als het onderliggend wegennet afneemt.

De simulaties laten verder zien dat publiek-private samenwerking waarbij een navigatie serviceprovider gaat samenwerken met een of meerdere wegbeheerders kan leiden tot een substantiële verbetering in de netwerk-performance. Een 'grand coalition' kan zelfs terugslag van congestie als gevolg van de capaciteitsreductie op de autosnelweg en vorming van een substantiële wachtrij op de afrit voorkomen. Voor de beschouwde casus, heeft de lokale wegbeheerder - in vergelijking met een samenwerkingsmodel waarbij wegbeheerders samenwerken - ook voordeel van een samenwerking van de nationale wegbeheerder en een serviceprovider, zelfs als hij zelf geen onderdeel is van deze coalitie.

Winnaars en verliezers

Het samenwerkingsmodel waarbij een navigatie serviceprovider gaat samenwerken is met name voordelig (in termen van intra- en inter-state reistijdverschilllen) voor die serviceprovider die juist niet deelneemt aan de samenwerking. Hoewel de gemiddelde reistijd van gebruikers van de navigatiedienst lager kan zijn dan in een situatie zonder samenwerking, is de samenwerkende serviceprovider slechter af ten opzichte van de concurrent die niet samenwerkt. Op basis van deze resultaten voor dit specifieke netwerk lijkt het onwaarschijnlijk dat een serviceprovider gaat meewerken in een coalitie. Dit kan eventueel wel worden bewerkstelligd als alle serviceproviders dit doen of als er voor het 'verlies' wordt gecompenseerd.

7.2 Discussie

De resultaten op basis van de gestileerde Almelo casus geven een indicatie van het verschil in impact tussen pro-actief in plaats van reactief handelen, net zoals het verschil tussen het geïsoleerd en samenwerkend inzetten van verkeersmanagement services. De casus laat zien dat het acteren op basis van de verwachte in plaats van huidige verkeerssituatie veel kan opleveren. Tegelijkertijd betekent samenwerking tussen partijen niet automatisch dat alle partijen hier baat bij hebben. Waar de studie zich richt op een specifieke casus is de vraag in hoeverre resultaten overdraagbaar zijn. Bijvoorbeeld: in de praktijk zetten meerdere partijen een grotere variatie aan verkeersmanagementdiensten in (toeritdoseerinstallaties, spitsstroken, etc.) en is het handelen van weggebruikers, wegbeheerders en serviceproviders op basis van informatie complexer dan aangenomen.

In het onderzoek is aangenomen dat een vast percentage van de gebruikers een advies opvolgt, en dat dit percentage vooraf bekend is. In werkelijkheid is dit percentage onzeker, en hangt dit af van onder meer de informatie, het netwerk, de verkeerssituatie en of men bekend is met de route. Voor wat betreft wegbeheerders is aangenomen dat het doel is om de TTS te minimaliseren. In de praktijk hebben wegbeheerders hoogstwaarschijnlijk meerdere doelstellingen. Zo kan een wegbeheerder naast het bevorderen van doorstroming ook als doel hebben om belangrijke voorzieningen bereikbaar te houden.

In de opzet van de samenwerkingsmodellen is onderscheid gemaakt tussen coöperatief en niet-coöperatief handelen. De stabiele uitkomst van niet-coöperatief handelen van verschillende partijen is gemodelleerd als een Nash evenwicht. Zoals aangegeven is het vinden van een Nash evenwicht gecompliceerd of soms zelfs onmogelijk. Ook kan het vinden van een dergelijk evenwicht tijdintensief zijn. In dit onderzoek is er daarnaast een gemengd Nash evenwicht geïntroduceerd. Om de rekentijd te beperken is voor de bijbehorende optimalisatieproblemen de standaard MATLAB-implementatie van het genetisch algoritme gebruikt, waarbij het aantal generaties per iteratie van het geïntroduceerde raamwerk beperkt (5 generaties, en 10 iteraties binnen het raamwerk).

Voor dit onderzoek is aangenomen dat twee serviceproviders actief zijn. Voor deze partijen is aangenomen dat zij als doel hebben om gebruikers de snelste route aan te bieden, waarbij het verschil in gerealiseerde reistijd ten opzichte van de snelste route een indicator is voor de penetratiegraad van de serviceprovider op de langere termijn. Dat wil zeggen: als een concurrerende navigatie serviceproviders een snellere route kan aanbieden zal dit op termijn zorgen voor een verschuiving in gebruikers. Het is gecompliceerd om de werkelijke dynamiek en potentiële verschuiving in penetratiegraden te modelleren. Zo zijn meerdere serviceproviders actief, is er vaak maar beperkt inzicht in hoeverre een andere route sneller zou zijn geweest, en zijn gebruikers niet altijd geïnteresseerd in de snelste route maar in een route die meerdere criteria afweegt, zoals reistijd en -afstand.

7.3 Suggesties voor vervolgonderzoek

Het onderzoek laat zien dat effectiviteit van verkeersmanagementdiensten kan worden vergroot als er wordt samengewerkt, en er een partij-overstijgend en consistent beeld ontstaat van de (toekomstige) verkeerssituatie waarbij services coherent worden ingezet. De niet-coöperatieve interactie tussen partijen en coalities is in deze studie gevat aan de hand van een (gemengd) Nash evenwicht. Uit dit en eerder onderzoek (Ohazulike, 2014; Malik et al., 2025) blijkt dat er geen of juist vele stabiele Nash evenwichten kunnen bestaan. Daarnaast is het numeriek bepalen van een Nash evenwicht een uitdaging. Het ontwikkelen van een methode om een dergelijk evenwicht te bepalen is onderwerp van vervolgonderzoek. Hierbij moet expliciet rekening worden gehouden met de mogelijkheid dat er potentieel meerdere Nash evenwichten zijn, die idealiter allemaal worden geïdentificeerd. Een belangrijke vraag hierbij is of het gemodelleerde spel en de bijbehorende uitkomst een goed beeld geven van de interactie tussen partijen, d.w.z. hoe wegbeheerders en serviceproviders anticiperen op het handelen van andere spelers als er niet wordt samengewerkt.

Waarde uitwisseling

Op basis van de resultaten voor de beschouwde casus in het onderzoek blijkt dat het bewerkstelligen van samenwerking gecompliceerd kan zijn. Immers, samenwerking leidt niet noodzakelijkerwijs tot een situatie waar alle partijen er op vooruit gaan. Dit houdt in dat er mogelijk geen natuurlijke prikkel is voor partijen om samen te werken. Vervolgonderzoek zou zich kunnen richten op het bepalen van voorwaarden en verkeerssituaties waarbij partijen bereid zijn om samen te werken. Een casus in Taale (2008) laat zien dat samenwerking onder bepaalde omstandigheden een 'win-win' situatie kan opleveren, waarbij zowel het systeem als individuele partijen profiteren van samenwerking. Dit biedt potentie voor samenwerking om bestaande infrastructuur beter te benutten, bijvoorbeeld in het kader van het project 'draaiende ringen', waarbij stadsringen cruciaal worden geacht voor de bereikbaarheid van steden.

Hoewel op systeemniveau de totale baten groter zijn dan de kosten, kunnen er – afhankelijk van het samenwerkingsmodel - duidelijke 'winnaars' en 'verliezers' worden geïdentificeerd. Hieruit zou kunnen worden opgemaakt dat 'verliezers' niet willen samenwerken. Tegelijkertijd kan een samenwerkingsmodel worden gerealiseerd indien er op een bepaalde manier compensatie of waarde uitwisseling tussen partijen plaatsvindt, of door middel van een bepaalde mate van sturing of verplichting. Concepten van speltheorie (bijv. Shapley waarde) zouden in dezen kunnen worden gebruikt om de (marginale) bijdrage van elke partij te kwantificeren, op basis waarvan een verdeling van baten kan worden bepaald.

Leren

In dit onderzoek is steeds een dag gemodelleerd. Om het handelen van service providers en wegbeheerders te vatten is gebruik gemaakt van een one-shot, d.w.z. eenmalig, spel. In de praktijk interacteren partijen echter over langere periode. Op basis van eerdere reacties zou een partij een inschatting kunnen maken (of kunnen leren) van het handelen van andere partijen die zich bezighouden met verkeersmanagement. Dit zou kunnen betekenen dat partijen - zonder daadwerkelijk samen te werken - steeds beter kunnen anticiperen op de invloed van handelen op de verkeerssituatie. In een dergelijk scenario met regelmatige interactie tussen serviceproviders en wegbeheerders kunnen partijen voor strategische doeleinden gaan samenwerken. Zo kan een partij bereid zijn om

in een bepaalde situatie een ‘offer’ te brengen, om in een andere situatie te kunnen ‘winnen’. De suggestie is om verder onderzoek te doen (bijvoorbeeld door middel van sessies zoals workshops met stakeholders) om daarmee de potentiële meerwaarde van samenwerking voor diverse partijen te identificeren.

Referenties

Calvert, S., van den Burg, B., and Taale, H. (2025). Impact of stakeholder cooperation for centralized route guidance and full automated vehicle compliance. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 25(2).

Chen, O. J. (1998). *Integration of dynamic traffic control and assignment*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology.

Eikenbroek, O. A. L., Still, G. J., and Van Berkum, E. C. (2022). Improving the performance of a traffic system by fair rerouting of travelers. *European Journal of Operational Research*, 299(1):195–207.

Eikenbroek, O. A. L., Still, G. J., van Berkum, E. C., and Kern, W. (2018). The boundedly rational user equilibrium: a parametric analysis with application to the network design problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 107:1–17.

Goudappel (2025). Monitor wegverkeergerelateerde informatiediensten 2024.

Groenendijk, J., de Kievit, M., van Min, E., and van Oosten, M. (2021). Socrates2.0 final evaluation. Technical report.

Malik, G., Proost, S., and Tampère, C. M. (2025). A game-theoretical model of road pricing with an endogenized user-equilibrium with multiple user classes. *Transportation Research Part B: Methodological*, 195:103211.

Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (2024). Monitor Smart Mobility 2024.

Ohazulike, A. E. (2014). *Road Pricing Mechanisms: A Game Theoretic and Multi-level Approach*. PhD thesis, TRAIL Thesis Series.

Rockafellar, R. T. (2018). Variational analysis of nash equilibrium. *Vietnam Journal of Mathematics*, 46(1):73–85.

Rockafellar, R. T. and Uryasev, S. (2002). Conditional value-at-risk for general loss distributions. *Journal of banking & finance*, 26(7):1443–1471.

Rockafellar, R. T. and Wets, R. J. (1998). *Variational analysis*. Springer.

Sefrioui, M. and Perlaux, J. (2000). Nash genetic algorithms: examples and applications. In *Proceedings of the 2000 congress on evolutionary computation*, volume 1, pages 509–516. IEEE.

Taale, H. (2008). *Integrated Anticipatory Control of Road Networks: A Game-Theoretical Approach*. PhD thesis, Trail Thesis Series.

Taale, H. (2020). Cooperative route guidance - a simulation study for stockholm. Technical report.

Trivella, A. (2018). *Decision Making under Uncertainty in Sustainable Energy Operations and Investments*. PhD thesis, DTU Management Engineering.

Wilmink, I., van den Broeke, A., and Berghout, L. (2003). De taakverdeling tussen netwerkstructuur en verkeersmanagement. In *Vervoersplanologisch Speurwerk*.