



# Nationaal verkeerskundecongres 2016

## Robuustheid en wegontwerp

Alex van Loon

*(Auteur is werkzaam bij Rijkswaterstaat)*

Maaïke Snelder

*(Auteur 2 is werkzaam bij TNO)*

### Samenvatting

Het nationale beleid is gericht op het terugdringen van structurele files en daarmee de reistijdverliezen. Daarnaast is er ook toenemende aandacht voor het beperken van files ten gevolge van incidenten. Door de hoge belasting van het hoofdwegennet betekent een incident immers al snel een grote file en daarmee onverwacht groot reistijdverlies. Rijkswaterstaat zet daarbij incidentmanagement in om het reistijdverlies voor de weggebruiker zoveel mogelijk te beperken. Om de gevolgen van verstoringen op het hoofdwegennet op een structurele manier te beperken, wordt gestreefd naar een robuust wegennet. Een robuust wegennet biedt de gebruikers alternatieven om op hun bestemming te komen en is in staat om incidenten en onverwachte situaties op te vangen. De vormgeving van de weg en het wegennet kunnen bijdragen aan de robuustheid van het wegsysteem. In welke mate verschillende wegsituaties daarop van invloed zijn, is echter nog niet in beeld gebracht. Rijkswaterstaat heeft daarom TNO gevraagd om de relatie tussen verschillende wegkenmerken en de gevolgen van lokale verstoringen inzichtelijk te maken. Deze paper is opgesteld door Alex van Loon van RWS en is grotendeels gebaseerd op de studie "Robuustheid en Wegontwerp" verricht door Maaïke Snelder van TNO [1].

Deze studie gaat in op de vraag in welke mate de vormgeving van de weg en het wegennet kunnen bijdragen aan de robuustheid van het hoofdwegennet. De robuustheid van een wegennet kan uitgedrukt worden in de mate waarin een wegsysteem zijn functie kan behouden bij lokale verstoringen, opdat er voor de weggebruiker geen onverwacht groot reistijdverlies optreedt. Als indicator voor robuustheid is het extra reistijdverlies als gevolg van een verstoring gehanteerd. Deze studie levert inzichten op in de mate waarin wegkenmerken (zoals rijstroken en vluchtstroken) en netwerkkenmerken (zoals in/uitvoegstroken en parallelbaansystemen) van invloed zijn op de ontwikkeling van extra reistijdverliezen bij verschillende soorten verstoringen. De resultaten van deze studie hebben weer als basis gediend om de robuustheid van het hoofdwegennet nader te bepalen. Tevens biedt deze studie kennis en inzicht voor de aanpak van robuustheidsknelpunten.

### Trefwoorden

Robuustheid, wegontwerp, incidenten, restcapaciteit, reistijdverlies



## Inleiding

Het nationale beleid is gericht op het terugdringen van structurele files en daarmee de reistijdverliezen. Daarnaast is er ook toenemende aandacht voor het beperken van files ten gevolge van incidenten. Door de hoge belasting van het hoofdwegennet betekent een incident immers al snel een grote file en daarmee onverwacht groot reistijdverlies. Rijkswaterstaat zet daarbij incidentmanagement in om het reistijdverlies voor de weggebruiker zoveel mogelijk te beperken. Om de gevolgen van verstoringen op het hoofdwegennet op een structurele manier te beperken, wordt gestreefd naar een robuust wegennet. Een robuust wegennet biedt de gebruikers alternatieven om op hun bestemming te komen en is in staat om incidenten en onverwachte situaties op te vangen. Robuustheid kan daarmee uitgedrukt worden in de mate waarin een wegsysteem zijn functie kan behouden bij lokale geplande en ongeplande verstoringen, opdat er voor de weggebruiker geen onverwacht groot reistijdverlies optreedt. De vormgeving van de weg en het wegennetwerk kunnen bijdragen aan de robuustheid van het wegsysteem. In welke mate verschillende wegsituaties daarop van invloed zijn is echter nog niet in beeld gebracht. Rijkswaterstaat heeft daarom TNO gevraagd om de relatie tussen verschillende wegkenmerken en de gevolgen van lokale verstoringen inzichtelijk te maken [1].

## Doel

Doel van de studie is om inzicht te krijgen in de mate waarin wegkenmerken (zoals rijstroken en vluchtstroken) en netwerkkenmerken (zoals in/uitvoegstroken en parallelbaansystemen) van invloed zijn op de ontwikkeling van extra reistijdverliezen bij verschillende soorten verstoringen.

## Afbakening

Omdat deze studie zich richt op de gevolgen van verstoringen (in termen van extra reistijdverlies) wordt de kans op een verstoring of de aard daarvan buiten beschouwing gelaten. Het gaat hierbij om lokale ongeplande verstoringen die in meer of mindere mate de capaciteit reduceren. Hierbij valt te denken aan pechgevallen, ongevallen, lading op het wegdek, wegwerkzaamheden, vrachtwagens die klem komen te zitten bij tunnels of viaducten etc. Regionale of landelijke verstoringen, zoals sneeuw en regen, vallen buiten de scope, omdat deze verstoringen het gehele of een groot deel van het netwerk beïnvloeden.

Deze studie is gericht op verstoringen op het hoofdwegennet. Het extra reistijdverlies als gevolg van de verstoringen wordt wel zoveel mogelijk op het hele wegennetwerk (dus ook onderliggend wegennetwerk) gemeten/gemodelleerd. Lokale verstoringen kunnen netwerkbreed effecten (reistijdverlies) hebben.

## Aanpak

Deze studie is in twee stappen gedaan. Als eerste stap is een theoretische verkenning van het effect van verstoringen bij verschillende weg- en netwerkkenmerken. Hierbij is gebruik gemaakt van een sterk vereenvoudigde modelsituatie. Als tweede stap is een verkenning gedaan naar het effect van verstoringen in deelnetwerken. Deze verkenning is gevalideerd aan de hand van een werkelijk deelnetwerk.

## Theoretische verkenning weg- en netwerkkenmerken

In deze theoretische verkenning proberen we het reistijdverlies als gevolg van een verstoring op een wegvak en bij discontinuïteiten te berekenen. Hierbij nemen we aan dat er geen terugslag is naar andere wegen, de verkeersvraag constant is in de tijd en de capaciteitsreductie constant is gedurende het incident.

Het totale extra reistijdverlies kan worden berekend door over de tijd het aantal voertuigen in de file (dichtheid \* lengte file) te vermenigvuldigen met het reistijdverlies van die voertuigen [2]:

$$TTT = \max\left(0, \frac{t^2(rC-C)(I-rC)}{2(I-C)}\right) = \max\left(0, \frac{t^2(r-1)(rC-I)}{2(1-I/C)}\right)$$



TTT = totale extra reistijdverlies voor alle weggebruikers als gevolg van een incident

I = intensiteit (verkeersvraag)

C = capaciteit

t = duur van het incident

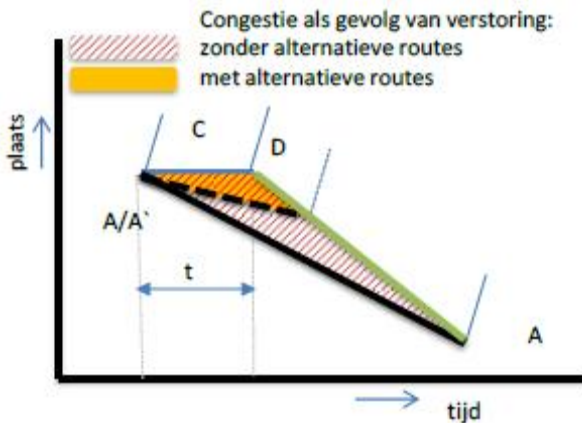
r = restcapaciteitsfactor

## Wegvak

Voor de volgende situaties is het effect op het reistijdverlies bepaald voor een theoretisch wegvak:

- Aantal rijstroken (capaciteit)
- Duur verstoring
- Capaciteitsreductie (ernst van verstoring ten opzichte van de capaciteit)
- Alternatieve routes (beïnvloeding verkeersvraag)

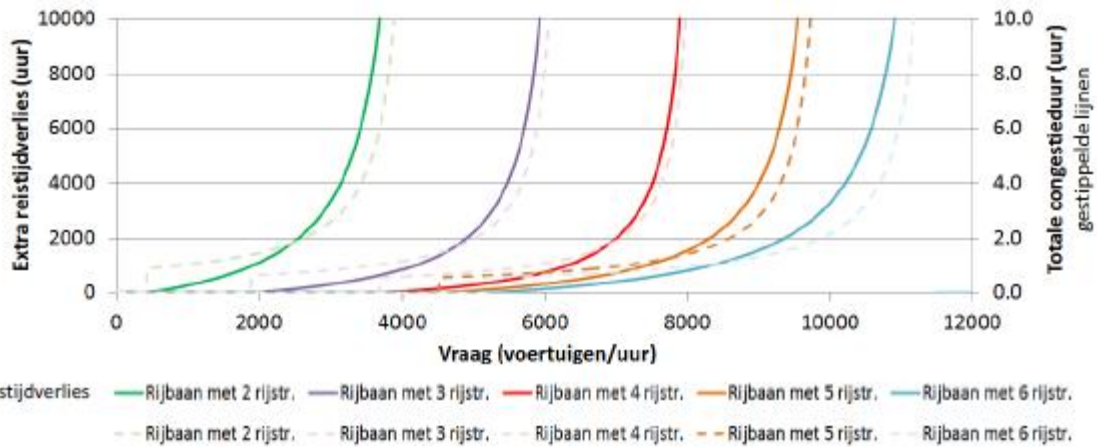
Voor de berekeningen in deze verkenning zijn een groot aantal uitgangspunten en aannames gehanteerd, zie [1] voor nadere toelichting hiervan.



Afbeelding 1: theoretische congestie in plaats-tijd diagram bij een lokale verstoring wegvak (zie [1] voor nadere toelichting)

Uit de berekeningen blijkt dat er in het algemeen kan worden gesteld dat naarmate de intensiteit op een wegvak de capaciteit nadert, het reistijdverlies als gevolg van een verstoring sterk toeneemt. Een wegvak met meer rijstroken leidt bij eenzelfde verstoring tot minder reistijdverlies dan een wegvak met 1 of 2 rijstroken. Het reistijdverlies neemt toe naarmate de ernst van de storing groter is (van pechgeval tot het blokkeren van een rijstrook tot het blokkeren van een rijbaan). Naarmate de verstoring langer duurt, neemt het reistijdverlies kwadratisch toe.

Het reistijdverlies op een wegvak kan afnemen naarmate men tijdig een alternatieve route kan kiezen. De mate waarin alternatieve routes daadwerkelijk een alternatief vormen hangt af van de extra omrijtijd en de beschikbare capaciteit op die routes. Naarmate de alternatieve routes zwaarder belast zijn leiden deze ook tot extra reistijdverlies.



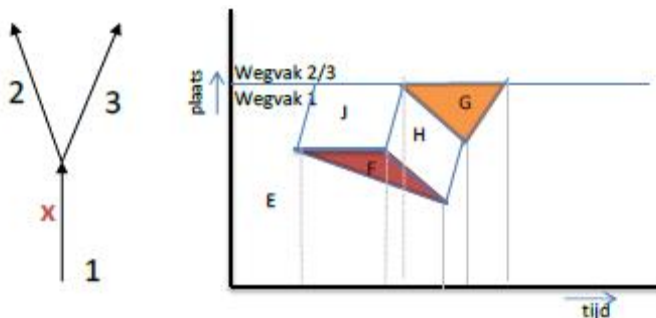
Afbeelding 2: extra reistijdverlies en congestieduur bij blokkade van twee rijstroken (zie [1] voor nadere toelichting)

In de verkenning zijn ook de reistijdverliezen ten gevolge verstoringen bij de volgende discontinuïteiten berekend (stroomopwaarts en stroomafwaarts):

- divergentiepunten
- convergentiepunten
- parallelstructuren

### Divergentiepunt stroomopwaarts

Bij een verstoring voor het divergentiepunt ontstaat eerst congestie als op een wegvak. Bij het oplossen van de verstoring kan er een secundair knelpunt ontstaan bij het divergentiepunt, afhankelijk van de uitstroombaciteit voor het divergentiepunt, de verdeling van het verkeer en de capaciteit van de wegvakken na het divergentiepunt.

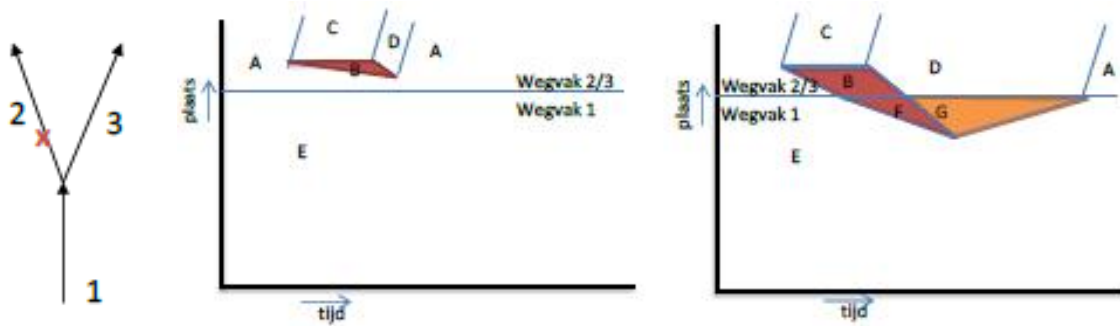


Afbeelding 3: theoretische congestie in plaats-tijd diagram bij een lokale verstoring stroomopwaarts van het divergentiepunt (zie [1] voor nadere toelichting)

### Divergentiepunt stroomafwaarts

Bij een verstoring na het divergentiepunt ontstaat eerst congestie als op een wegvak maar kan terugslaan naar het divergentiepunt waardoor daar een secundair knelpunt kan ontstaan.

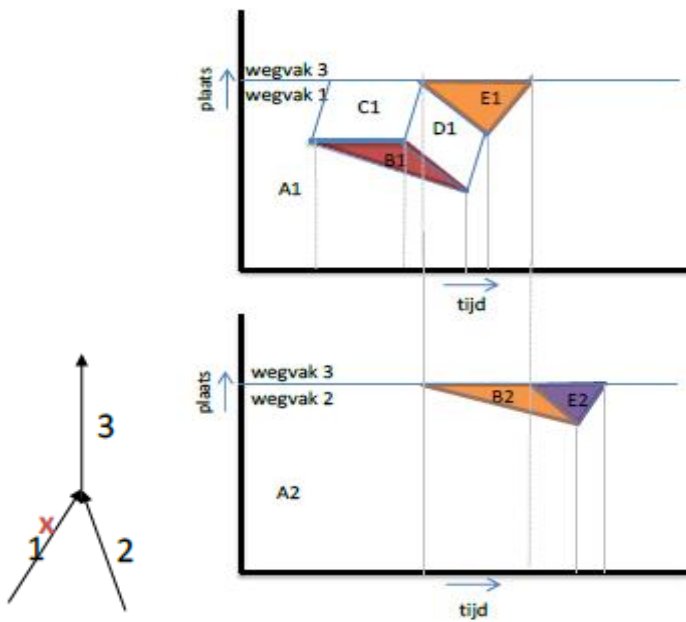




Afbeelding 4: theoretische congestie in plaats-tijd diagram bij een lokale verstoring stroomafwaarts van het divergentiepunt (zie [1] voor nadere toelichting)

### Convergentiepunt stroomopwaarts

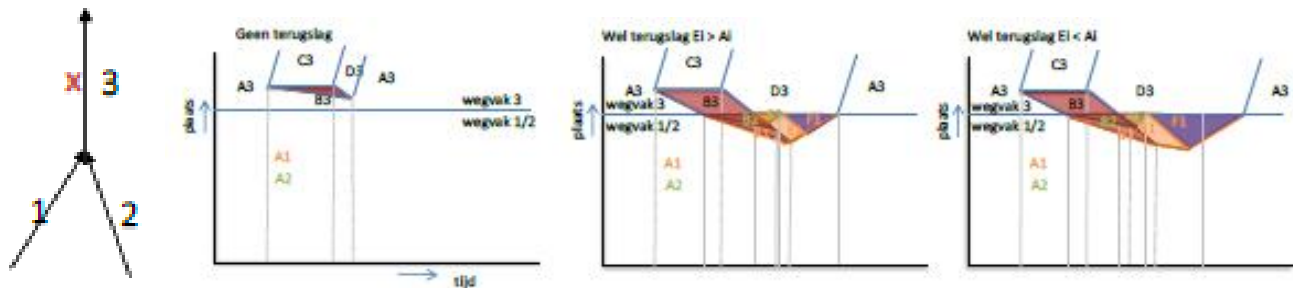
Bij een verstoring voor het convergentiepunt ontstaat congestie op het wegvak van de verstoring. Bij het oplossen van de verstoring kan er een secundair knelpunt ontstaan bij het convergentiepunt waardoor er zowel op wegvak 1 als op wegvak 2 congestie kan ontstaan.



Afbeelding 5: theoretische congestie in plaats-tijd diagram bij een lokale verstoring stroomopwaarts van het convergentiepunt (zie [1] voor nadere toelichting)

### Convergentiepunt stroomopwaarts

Bij een verstoring na het convergentiepunt ontstaat eerst congestie op het wegvak van de verstoring. Deze kan terugslaan tot het convergentiepunt waardoor daar een secundair knelpunt kan ontstaan. Bij het oplossen van de verstoring kan de secundaire congestie op de wegvakken 1 en 2 nog even voortduren afhankelijk van de verkeersvraag en uitstroomcapaciteit op deze wegvakken.



Afbeelding 6: theoretische congestie in plaats-tijd diagram bij een lokale verstoring stroomafwaarts van het convergentiepunt (zie [1] voor nadere toelichting)

### Parallelstructuren

Een parallelstructuur bestaat in feite uit een extra divergentie- en een convergentiepunt. Hierbij kunnen de eerder genoemde congestieproblemen zich extra voordoen ten opzichte van een normale situatie. Omdat een parallelstructuur per baan minder rijstroken en dus minder restcapaciteit heeft, leidt deze situatie bij een verstoring tot meer reistijdverlies dan bij een situatie met één rijbaan. Alleen bij een verstoring op de hoofdrijbaan kan het reistijdverlies lager zijn omdat men kan uitwijken naar de parallelbaan, mits daar voldoende capaciteit beschikbaar is en de file niet terugslaat naar het divergentiepunt. Omgekeerd bij een verstoring op de parallelbaan is de hoofdrijbaan voor het bestemmingsverkeer geen alternatief omdat dan het verkeer de aansluiting aan de parallelbaan niet kan bereiken. Deze bevindingen zijn ook geconstateerd in de studie naar ontvlechtingen [3].

### Verkenning deelnetwerken

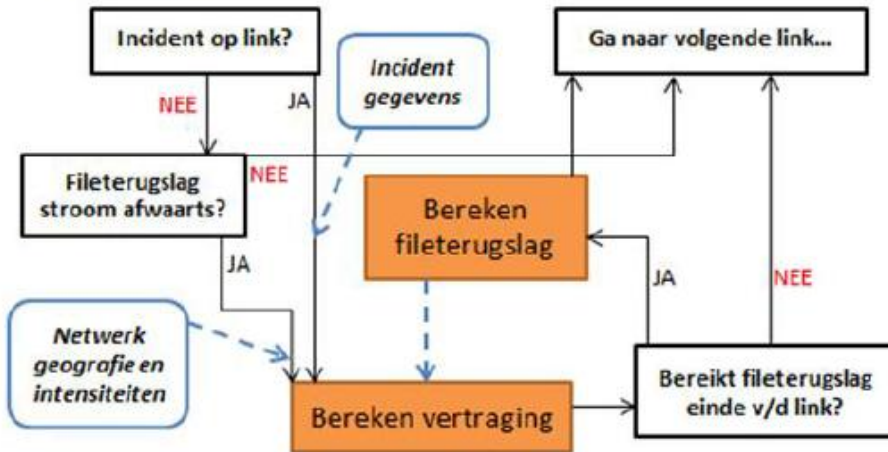
Om de effecten van verstoringen op netwerk niveau te berekenen is ingezoomd op vijf deelnetwerken, ofwel 5 incidentlocaties, binnen het wegennetwerk van West-Nederland waarbij rekening is gehouden met verschillende incidenttypes die zich kunnen voordoen, de hoogte van de verkeersvraag en het tijdstip van het incident.

De methodiek maakt gebruik van de volgende stappen om tot een eindresultaat te komen voor een scenario (zie afbeelding 7):

- Een wegennetwerk van het LMS wordt ingeladen met weggegevens en verkeersintensiteiten op linkniveau. De intensiteitswaarden zijn per minuut en afkomstig uit ATOL (analyse instrument van TNO voor lusdata).
- Bij het berekenen van de effecten van een incident worden alle links uit het netwerk één voor één doorlopen. Als er een incident plaatsvindt op een link of er fileterugslag vanuit een stroomafwaartse link optreedt, wordt een berekening uitgevoerd. Als er geen incident plaatsvindt op die link en ook geen fileterugslag plaatsvindt, dan wordt de link overgeslagen en wordt naar de volgende link gekeken.
- De berekening van het extra reistijdverlies per link wordt uitgevoerd.



Per link doorlopen



Afbeelding 7: netwerkalgoritme

Aan de hand van de volgende incidentscenario's wordt inzicht gegeven in de prestaties van het wegennet bij verstoringen:

1. A13L tussen kp Kleinpolderplein en afslag N209 (zonder vluchtstrook)
2. A13L tussen N209 en afslag Delft-Zuid (met spitsstrook)
3. A15L na afslag Rozenburg (weinig alternatieve routes)
4. A20L tussen de aansluitingen Crooswijk en Rotterdam-Centrum
5. A16L op de parallelrijbaan van de Van Brienoordbrug

Op de deelnetwerken worden zes incidenttypes als verstoringen gesimuleerd:

- a) personenauto met pech op de rijbaan
- b) vrachtauto met pech
- c) ongeval met vrachtauto
- d) ongeval met personenauto en één rijstrook afgesloten
- e) ongeval met personenauto en twee rijstroken afgesloten
- f) ongeval met personenauto en drie rijstroken afgesloten

*Validatie*

Ter validatie van het gebruikte netwerkmodel is gekeken naar enkele incidenten die zich hebben voorgedaan op de deelnetwerken. Hierbij is een vergelijking gemaakt tussen de resultaten uit een data-analyse en de resultaten uit het model voor dezelfde incidenten. De vergelijking geschiedt op basis van het extra reistijdverlies als gevolg van de incidenten.

Uit de resultaten blijkt dat de modelresultaten hoger liggen dan de dataresultaten. De verhouding tussen de twee is echter consistent op circa 30%. Dit geeft aan dat het model wel in staat is om de effecten van verschillende incidenten te berekenen voor verschillende incidenten op verschillende locaties, maar dat in de totale modelberekening een overschatting gemaakt wordt van het totale extra reistijdverlies ten opzichte van de data-analyse.

Ondanks deze afwijkingen, die deels rekentechnisch zijn en deels met de uitgangspunten te maken hebben, kan worden geconcludeerd dat het model bruikbaar is om de invloed van wegkenmerken op de robuustheid van deelnetwerken te analyseren, omdat naar relatieve verschillen wordt gekeken.



## *Bevindingen naar de verschillende locaties*

- Locaties 1 en 2 bevinden zich allebei op de A13, waarbij locatie 1 geen vluchtstrook heeft en locatie 2 een spitsstrook heeft die dichtgaat bij een ongeval. De gevolgen voor incidenttypes a, b, d en f zijn tussen de locaties vergelijkbaar. Echter voor type e en vooral type c is het extra reistijdverlies op de spitsstrooklocatie veel groter. Voor deze incidenten blijft circa de helft van de capaciteit beschikbaar. Voor locatie 2 valt ook een spitsstrook af. Dat leidt tot extra vertraging. Dit effect is nauwelijks zichtbaar bij de kleinere incidenten en bij het zwaarste incident.
- De effecten van incidenten op de A15 (locatie 3) blijken over alle incidenttypes mee te vallen. De restcapaciteit op deze weg is relatief groot ten opzichte van de andere wegen. Alleen bij incidenttype f is er sprake van een aanzienlijk extra vertraging. Er moet echter wel opgemerkt worden dat de kans op zwaardere incidenten op de A15 groter is dan voor een gemiddelde snelweg als gevolg van een hoger dan gemiddeld percentage vrachtverkeer.
- Locatie 4 (A20) leidt bij alle incidenttypes tot de grootste vertragingen. De oorzaak hiervan is de netwerkligging, waardoor fileterugslag een verregaand effect heeft op andere verkeersstromen, en de geringe restcapaciteit.
- Op locatie 5 (A16 PRB) zien we voor alle incidenttypes een aanzienlijke vertraging optreden. Dit heeft te maken met de aanname dat er een verschuiving in routes optreedt naar de hoofdrijbaan (aanname: 50% van de gereduceerde capaciteit verschuift naar de hoofdrijbaan). Dat zorgt vervolgens voor meer file op de hoofdrijbaan. Wanneer deze aanname niet gemaakt wordt en er dus geen verschuiving optreedt, dan zien we bij de kleinere incidenten een lager extra reistijdverlies, terwijl bij zware incidenten meer reistijdverlies optreedt als men zich niet verdeelt over de rijbanen. Bij zware incidenten loont het dus om een alternatieve route te kiezen.

In de studie is ook gekeken wat het effect is van alternatieve ontwerpen als robuustheidsmaatregelen op de reistijdverliezen bij incidenten. Hieruit blijkt dat het aanleggen van een vluchtstrook, het ombouwen van een spitsstrook en het beschikbaar stellen van een alternatieve route overwegend een positieve invloed hebben op de robuustheid. Het afsluiten van een oprit heeft een positief effect op het HWN maar kan leiden tot een negatief effect op het OWN. De vraag of een parallelstructuur positief bijdraagt aan de robuustheid van een netwerk hangt af van de intensiteitsniveaus, de variatie daarin over de dag, de mix van incidenttypes die optreden en de mate waarin een verschuiving naar de andere rijbaan optreedt bij incidenten.

## **Conclusies**

Uit deze studie blijkt dat er in het algemeen kan worden gesteld dat naarmate de intensiteit op een wegvak de capaciteit nadert, het reistijdverlies als gevolg van een verstoring sterk toeneemt. Een wegvak met meer rijstroken leidt bij eenzelfde verstoring en zelfde vraagniveau tot minder reistijdverlies dan een wegvak met 1 of 2 rijstroken. Op meer rijstroken kan echter ook meer verkeer worden afgewikkeld, waardoor het reistijdverlies van hetzelfde incident toch groter kan zijn op wegen met meer rijstroken. Het reistijdverlies neemt toe naarmate de ernst van de storing groter is (van pechgeval tot het blokkeren van een rijstrook tot het blokkeren van een rijbaan). Naarmate de verstoring langer duurt, neemt het reistijdverlies kwadratisch toe.

Het reistijdverlies op een wegvak kan afnemen naarmate men tijdig een alternatieve route kan kiezen. De mate waarin alternatieve routes daadwerkelijk een alternatief vormen hangt af van de extra omrijtijd en de beschikbare capaciteit op die routes. Naarmate de alternatieve routes zwaarder belast zijn kan daar ook extra reistijdverlies optreden.

Bij verstoringen stroomopwaarts of stroomafwaarts bij convergentie- en divergentiepunten kunnen secundaire fileknelpunten ontstaan rond deze convergentie- en divergentiepunten, zowel bij het ontstaan als het oplossen van incidentcongestie.





Verder komt uit de studie naar voren dat de volgende wegontwerp- en netwerkkenmerken van invloed zijn op de robuustheid:

- Alternatieve routes en vluchtstroken hebben een positief effect op de robuustheid.
- Een spitsstrook in plaats van een rijstrook heeft een negatief effect op de robuustheid, terwijl een spitsstrook in plaats van een vluchtstrook over het algemeen een positief effect heeft omdat dit een extra rijstrook oplevert (zie vorige punt).
- De invloed van scheiding hoofd- en parallelrijbanen (ontvlechting) hangt af van de intensiteitsniveaus, de variatie daarin over de dag, de mix van incidenttypes die optreden en de mate waarin het verkeer de andere rijbaan kiest bij incidenten.

De resultaten van deze studie hebben weer als basis gediend om de robuustheid van het hoofdwegennet nader te bepalen. Tevens biedt deze studie kennis en inzicht voor de aanpak van robuustheidsknelpunten.

## Discussie

### *Robuustheid en de afstand tussen knooppunt en aansluitingen*

Uit deze studie blijkt dat de aanwezigheid van convergentie- en divergentiepunten in een netwerk zoals bij knooppunten en aansluitingen kunnen leiden tot extra reistijdverlies bij verstoringen. Dit pleit er voor uit oogpunt van robuustheid om het aantal knooppunten en aansluitingen in een netwerk te beperken. Daarentegen maken knooppunten en aansluitingen alternatieve routes mogelijk en daarmee reistijdverlies te beperken. Dit pleit er voor om uit oogpunt van robuustheid juist zoveel mogelijk knooppunten en aansluitingen in een netwerk te realiseren.

## Literatuur

[1] Snelder, M., Calvert, S., Feijter, E., Minderhoud, M., 2015. *Robuustheid en wegontwerp*, Delft

[2] Knoop, V.L., 2009. *Road Incidents and Network Dynamics Effects on driving behaviour and traffic congestion*, Delft: TRAIL thesis series, TR2009/13.

[3] Van Loon, A., Walhout, R., Van der Velden, B., 2015. *Verkeerskundige overwegingen bij ontvlechtingen op autosnelwegen en weggebruikers wegwijs maken*, paper ten behoeve van het Nationaal Verkeerskunde Congres 2015