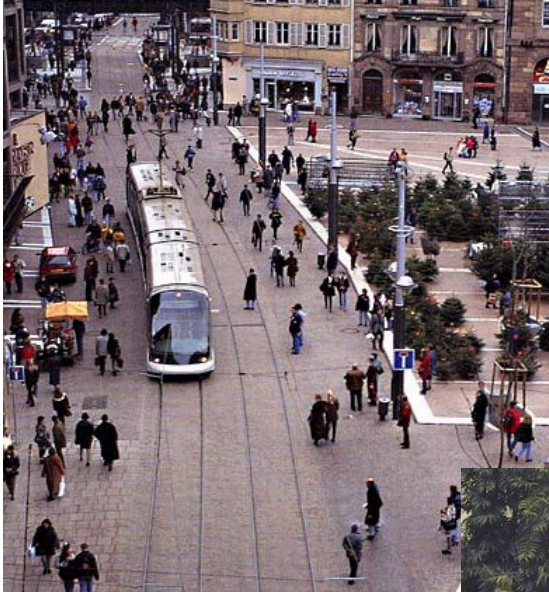


Op weg naar robuuste OV-netwerken

Eindrapport afstudeerwerk



mei 2005
Pieter de Jong
9404739

TUDelft

Faculteit der Civiele Techniek en Geowetenschappen
Sectie Transportation & Planning

Op weg naar robuuste OV-netwerken

Eindrapport afstudeerwerk

Studie naar de effecten van verstoringen in de beschikbaarheid van infrastructuur voor het netwerkontwerp van een stedelijk OV-netwerk. Deze effecten komen tot uitdrukking in de kosten, betrouwbaarheid en robuustheid van het dienstennetwerk

Mei 2005
Pieter de Jong
9404739



Faculteit der Civiele Techniek en Geowetenschappen
Sectie Transportation & Planning

Voorwoord

Voor u ligt het eindrapport van mijn afstudeeronderzoek naar de effecten van verstoringen in de beschikbaarheid van infrastructuur op het netwerkontwerpniveau. Het was zeer interessant om dit onderzoek uit te voeren, omdat het onbekend was hoe groot deze effecten zouden zijn en wat dit zou betekenen voor eventuele aanpassingen in het netwerkontwerp.

Het is tevens een zeer actueel item om te streven naar meer betrouwbare en robuuste dienstennetwerken. Iedereen kent in zijn eigen omgeving wel voorbeelden waarin hij ziet dat de dienstuitvoering van het openbaar vervoer niet loopt zoals die zou moeten lopen. Het is mooi om in een afstudeeronderzoek een bijdrage te leveren aan mogelijke nieuwe inzichten in het ontwerpprobleem van openbaar vervoer.

Ik heb met heel veel plezier aan dit onderzoek gewerkt. Het is ook een afsluiting van een hele periode aan de TU Delft waarin je van alles geleerd hebt. Ondanks al dat geleerde had ik zonder mijn begeleiders niet uit alle problemen gekomen, en wil ik hen van harte bedanken voor alle steun, begeleiding en wijze woorden, met name mijn dagelijks begeleider Rob van Nes, maar natuurlijk ook de andere leden van de afstudeercommissie die hieronder vermeld staan. Verder wil ik dhr. Kok bedanken voor zijn informatie over de omgang met verstoringen in het dienstennetwerk van de HTM

Afstudeercommissie:

Prof. dr. ir. P.H.L. Bovy (TU Delft, faculteit CiTG, sectie Transportation / Planning)
Dr. ir. R. van Nes (TU Delft, faculteit CiTG, sectie Transportation / Planning)
Dr. ir. G. Hooghiemstra (TU Delft, faculteit EWI, sectie Toegepaste Wiskunde)
Ir. P.B.L. Wiggenraad (TU Delft, faculteit CiTG, sectie Transportation / Planning)

Rest mij een ieder die dit rapport onder ogen krijgt, veel plezier toe te wensen bij het lezen ervan,

Pieter de Jong
Delft, mei 2005

Samenvatting

Dit rapport bevat het onderzoek naar de effecten van verstoringen in de beschikbaarheid van infrastructuur voor het netwerkontwerp van stedelijk openbaar vervoer. In een stad gebeurt van alles waardoor de dienstuitvoering van openbaar vervoer geregeld tijdelijk verstoord raakt. De ene keer is zo'n verstoring minder erg dan de andere keer.

Er is nog weinig bekend over de effecten van mogelijke verstoringen voor het netwerkontwerp. Daarom zijn deze effecten onderzocht in de analyse die is uitgevoerd. De effecten komen tot uitdrukking in kosten, betrouwbaarheid en robuustheid van een dienstennetwerk. Gezien het grote verschil in infrastructuurdichtheid van weg- en railgebonden vervoer in een stad, is gekozen om deze twee vervoertechnieken te onderzoeken en hun effecten als gevolg van de verstoringen te vergelijken met elkaar. Verwacht wordt namelijk dat de dienstuitvoering van een bussysteem flexibeler is dan die van een tramsysteem en dat dit doorwerkt op de effecten van de verstoringen.

In het transportsysteem grijpen verstoringen op drie niveau's aan: het niveau van de verplaatsingen, het niveau van de vervoerdiensten en het niveau van de verkeerdiensten. Gekozen is om te kijken naar de verstoringen in de verkeersdiensten, dus naar de beschikbaarheid van de infrastructuur.

De verstoringen in de beschikbaarheid van infrastructuur waarvan het effect voor de dienstuitvoering berekend is, zijn de volgende:

- ♣ Kleine verstoringen zoals ongevallen
- ♣ Weersinvloeden waarbij onderscheid is gemaakt naar storm, ijzel, sneeuw en onweer
- ♣ Grote verstoringen zoals onderhoudswerkzaamheden aan de infrastructuur

Van deze typen verstoringen is hun impact bepaald op het infra- en dienstennetwerk van een bus- en een tramsysteem. Om de effecten van de verstoringen te kunnen berekenen, is gekozen om de verstoringen te simuleren waartoe een model is gemaakt. In dit model is het netwerkontwerpniveau gegeven door 5 dienstennetwerkvarianten die in de analyse worden vergeleken met elkaar. Die dienstennetwerken hebben een ring-radiale structuur waarbij de ontwerpvrage de optimale positie van de ringlijn is. De eerste variant heeft geen ringlijn, de tweede een ringlijn dicht bij het centrum,....., en de vijfde variant heeft een ringlijn aan de buitenkant van de stad langs de uiteinden van de radiaallijnen.

Het model berekent uit een kansverdeling voor tijdsduur en frequentie van elk type verstoring de impact van de verstoring op het infra- en dienstennetwerk. Het beschikbare infra- en dienstennetwerk zijn dus stochastisch. Met een todelingsmethode (alles-of-niets) zijn de reizigers vervolgens toegedeeld over het gerealiseerde dienstennetwerk. Uit de verplaatsingen van de reizigers en de routes van de OV-diensten in het netwerk zijn de reiskosten, kosten voor niet gemaakte verplaatsingen en de exploitatiekosten berekend. Hiermee zijn de effecten bekend voor het netwerkontwerpniveau. De reiskosten zeggen namelijk iets over de betrouwbaarheid van het netwerk, de kosten voor niet gemaakte verplaatsingen iets over de robuustheid en de som van alle kostencomponenten is het effect van de verstoring over de totale kosten.

De belangrijkste conclusies uit de analyse zijn de volgende:

- ♣ 1 De optimale netwerkvariant is verschillend vanuit kosten oogpunt, robuustheid en betrouwbaarheid. Dit maakt het plausibel om niet alleen kostenminimalisatie mee te nemen in de doelfunctie van het netwerkontwerpprobleem, maar ook effecten als robuustheid en betrouwbaarheid

- ♣ 2 Door een verschil in flexibiliteit van het dienstennetwerk tussen weg- en railtechniek hebben verstoringen een verschillend effect. Het verschil in flexibiliteit blijkt terug te komen in de effecten van de verstoringen. Bij een tramsysteem zijn er veel vaker verplaatsingen niet mogelijk dan bij een bussysteem omdat een tram voor een omrijroute van een beperkte hoeveelheid railinfra gebruik kan maken. Ook zijn de omrijroutes in een tramnetwerk een stuk langer dan in een busnetwerk doordat een bus eenvoudig een straat om kan rijden en daarna zijn normale route weer kan vervolgen.
- ♣ 3 Het effect van de verstoringen op de totale kosten van een bus- en een tramsysteem is niet groot. Uiteindelijk blijken de effecten van de verstoringen op de totale kosten niet groot te zijn. Bij een bussysteem is een maximale stijging van de kosten te zien van 2,5 ‰ en bij een tramsysteem een maximale stijging van 24 ‰. De kostenstijging voor de tram t.o.v. de bus scheelt wel een factor 10. Met scenario's waarin typen verstoringen vaker optreden en een gevoeligheidsanalyse met parameters die in het model gebruikt zijn, zijn wel grotere kostenstijgingen waarneembaar.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	1
2	Transportnetwerken en netwerkbetrouwbaarheid	3
	2.1 Inleiding	3
	2.2 Transportsysteem	3
	2.3 Transportnetwerken	4
	2.3.1 Beschrijving transportnetwerken	4
	2.3.2 Netwerkcategorieën	6
	2.3.3 Eigenschappen van transportnetwerken	7
	2.4 Algemene netwerkontwerpprobleem	8
	2.5 Netwerkontwerpprobleem voor OV en de ‘missende schakel’ daarin	10
	2.6 Robuustheid en betrouwbaarheid van een netwerk	11
	2.6.1 Robuustheid van een transportnetwerk	11
	2.5.2 Betrouwbaarheid van een transportnetwerk	12
	2.7 Koppeling robuustheid/betrouwbaarheid naar het NOP	14
3	Verstoringen transportsysteem en afbakening/opzet onderzoek	15
	3.1 Inleiding	15
	3.2 Verstoringen in het transportsysteem	15
	3.3 Afbakening onderzoek	16
	3.4 Probleemschets van het onderzoek	17
	3.5 Doelstellingen/centrale vraag van het onderzoek	18
	3.6 Opzet onderzoek	18
4	Externe invloeden op een OV-netwerk	20
	4.1 Inleiding	20
	4.2 Soorten externe invloeden	20
	4.3 Keuze en overzicht te modelleren verstoringen	23
	4.4 Vergelijking bus-tramsysteem	24
5	Beschrijving model en modelkeuzes	26
	5.1 Inleiding	26
	5.2 Ontwerpopzet voor doorrekening effecten	26
	5.3 Keuze berekeningsmethode	28
	5.4 Ontwikkelde model	30
	5.5 Beschrijving componenten van het model	31
	5.5.1 Invoer	31
	5.5.2 Verwerkingsblokken	37
	5.5.3 Uitvoer	50
6	Toepassing van het model en invoerkeuzes	51
	6.1 Inleiding	51
	6.2 Opzet van de analyse	51
	6.2.1 Invoer	51
	6.2.2 Verwerkingsblokken	51

6.3	Gebruikte parameters in de analyse	56
7	Resultaten van de analyse, discussie en reflectie	57
7.1	Inleiding	57
7.2	Uitkomsten onverstoorte situatie	57
7.3	Aanbodpatroon van infrastructuur en van vervoerdiensten	58
7.4	Resultaten van de analyse	60
7.4.1	Meest robuuste netwerkvariant	61
7.4.2	Meest betrouwbare netwerkvariant	64
7.4.3	Uitsplitsing totale kosten	67
7.4.4	Minimale totale kosten, exploitatie- en gebruikerskosten	70
7.4.5	Beste variant op basis van de drie criteria	75
7.4.6	Doorwerking flexibiliteit in effecten verstoringen	76
7.5	Scenario's van verstoringen en gevoeligheidsanalyse	78
7.5.1	Inleiding	78
7.5.2	Resultaten scenario's bussysteem	78
7.5.3	Resultaten scenario's tramsysteem	79
7.5.4	Conclusies uit de scenario's van verstoringen	80
7.6	Gevoeligheden van parameters	81
7.6.1	Inleiding	81
7.6.2	Resultaten gevoeligheidsanalyse bussysteem	81
7.6.3	Resultaten gevoeligheidsanalyse tramsysteem	82
7.6.4	Conclusies uit de gevoeligheidsanalyse	83
7.7	Effect verstoringen op het netwerkontwerpprobleem	83
7.7.1	Effect verstoringen voor de reiziger	83
7.7.2	Effect verstoringen voor de exploitant	84
7.7.3	Effect verstoringen voor de overheid	84
7.8	Discussie over gemaakte keuzes en reflectie	85
7.8.1	Verhouding exploitatiekosten-reiskosten	85
7.8.2	Validiteit gemaakte aannames	86
7.8.3	Reflectie gemaakte model en relevantie ontwerppraktijk	86
8	Conclusies en aanbevelingen voor verder onderzoek	89
8.1	Inleiding	89
8.2	Conclusies	89
8.3	Aanbevelingen verder onderzoek	92
	Literatuurlijst	94

Bijlagen

- 1 Verslag van gesprek bij de HTM

Hoofdstuk 1 Inleiding

Een stad leeft. Er wonen en werken veel mensen, het is er altijd druk op straat en er zijn veel vervoermogelijkheden. Naast drukte in de stad wordt er in een stad veel gebouwd:

Nieuwbouw of renovatie aan oude monumentale panden. Er kunnen evenementen zijn en bruggen die in de zomerperiode geregeld opengaan. Kortom, er speelt van alles in een stad. Het moge duidelijk zijn dat openbaar vervoer in de stad regelmatig verstoord wordt. Zo'n verstoring kan zich beperken tot een auto die aan het inparkeren is, maar de hinder kan ook komen door een ongeval of door een vrachtwagen die zijn lading aan het lossen is en dan duurt de overlast wat langer. Deze verstoringen leiden tot ongewenste fluctuaties in de rijtijd van voertuigen of zelfs tot uitval van gedeeltes van OV-lijnen.

De hierboven genoemde verstoringen zijn zomaar een aantal mogelijke verstoringen die ingrijpen op het transportsysteem. In werkelijkheid zijn er nog meer verstoringen.

In het huidige netwerkontwerpprobleem voor transportnetwerken wordt niet of nauwelijks rekening gehouden met verstoringen in het transportsysteem. Dit onderzoek is een analyse van een deel van die verstoringen. En dan met name, de verstoringen in de beschikbaarheid van infrastructuur. De effecten van dit type verstoringen zijn bekeken voor een stedelijk openbaar vervoersysteem.

Bij het netwerkontwerpprobleem voor OV-dienstennetwerken zijn verschillende partijen betrokken. Aan de ene kant de exploitant/investeerder die de investerings- en exploitatiekosten probeert te minimaliseren. En aan de andere kant de gebruiker die een zo kort of zo snel mogelijke route over het netwerk probeert te krijgen. Er kan ook nog een derde partij onderscheiden worden; dit is de overheid die een balans probeert te vinden tussen beide partijen. De onzekerheden in de verkeersdiensten hebben voor alle partijen effecten. Hoe groot die effecten zijn, zal onderzocht worden in dit onderzoek.

De onzekerheden in de beschikbaarheid van infra hebben effect op de kosten en het gebruik van het netwerk. Om de prestatie van een netwerk onder veranderende omstandigheden als gevolg van verstoringen te kunnen beoordelen, kijken we naast de effecten voor de kosten naar de robuustheid en de betrouwbaarheid van het dienstennetwerk. Deze laatste twee criteria worden nauwelijks meegenomen bij het netwerkontwerpprobleem. Op basis van de verschillende beoordelingscriteria en het onderscheid naar effecten voor de verschillende partijen die betrokken zijn bij het netwerkontwerp ontstaat een goed beeld over de invloed en doorwerking van onzekerheden in de verkeersdiensten op het netwerkontwerp.

Centrale vraag van het onderzoek is dus om de verstoringen in de beschikbaarheid van infrastructuur in kaart te brengen en te kijken wat het effect daarvan is voor het netwerkontwerp van stedelijk openbaar vervoer. Hiervoor is het noodzakelijk dat we het *effect* van de *verstoringen* op de *kosten* en het *effect* voor de *reiziger* te weten komen bij een gegeven netwerkstructuur.

De opzet van dit rapport is als volgt:

In hoofdstuk 2 worden de transportnetwerken beschreven (die verplaatsingen binnen het transportsysteem mogelijk maken) en wordt het netwerkontwerpprobleem en de complexiteit daarvan uitgelegd. Aan het eind van dat hoofdstuk wordt ingegaan op de definities van betrouwbaarheid en robuustheid voor dit onderzoek en de koppeling van die twee effecten naar het netwerkontwerpprobleem.

Het transportsysteem met de verstoringen die daarop aangrijpen, is toegelicht in hoofdstuk 3. Hier is de keuze gemaakt om verstoringen in de verkeersdiensten te onderzoeken. Met die verstoringen wordt het onderzoeksterrein verder afgebakend en hieruit vloeien de

probleemschets en de doelstelling voor het onderzoek voort. Aan het eind van hoofdstuk 3 volgt de opzet van het onderzoek.

Hoofdstuk 4 behandelt de factoren die tot verstoringen in de beschikbaarheid van infrastructuur kunnen leiden. Als de verstoringen gekozen zijn die geanalyseerd worden, wordt verder ingegaan op hun impact op het stedelijk OV-netwerk. Tevens is hier een vergelijking gemaakt tussen weggebonden vervoer (bussysteem) en railgebonden vervoer (tramsysteem).

In hoofdstuk 5 wordt de keuze gemaakt voor een berekeningsmethode, analytisch of een simulatiemethode. Om de effecten van verstoringen door te kunnen rekenen, wordt het model gepresenteerd waarmee de effecten voor de gebruikers en voor de exploitant berekend kunnen worden. Alle componenten van het model en de bijbehorende *model*keuzes passeren hier de revue. Daar zit onder andere de impact van verstoringen op het infra- en dienstennetwerk bij. Om hier een goede implementatie aan te geven, is er een gesprek gevoerd met een medewerker van de HTM. Dit kunt u lezen in bijlage 1.

De opzet van de analyse met het model en de *invoer*keuzes die gemaakt zijn, vallen onder hoofdstuk 6. Alle parameters die gebruikt zijn bij de modellering, worden hier opgesomd. De matlabcode met alle invoerbestanden waarmee de analyse is uitgevoerd, is bijgevoegd op de cd.

De resultaten van de analyse zijn te vinden in hoofdstuk 7 evenals de scenario's van de typen verstoringen en de gevoeligheidsanalyse. Hiermee ontstaat een breder beeld over de gevoeligheden van de uitkomsten van de analyse. Tot slot volgt hier een discussie over de gemaakte keuzes en een reflectie van de resultaten voor de ontwerppraktijk.

In hoofdstuk 8 zijn de hoofdconclusies op een rij gezet en zijn er aanbevelingen gedaan voor verder onderzoek.

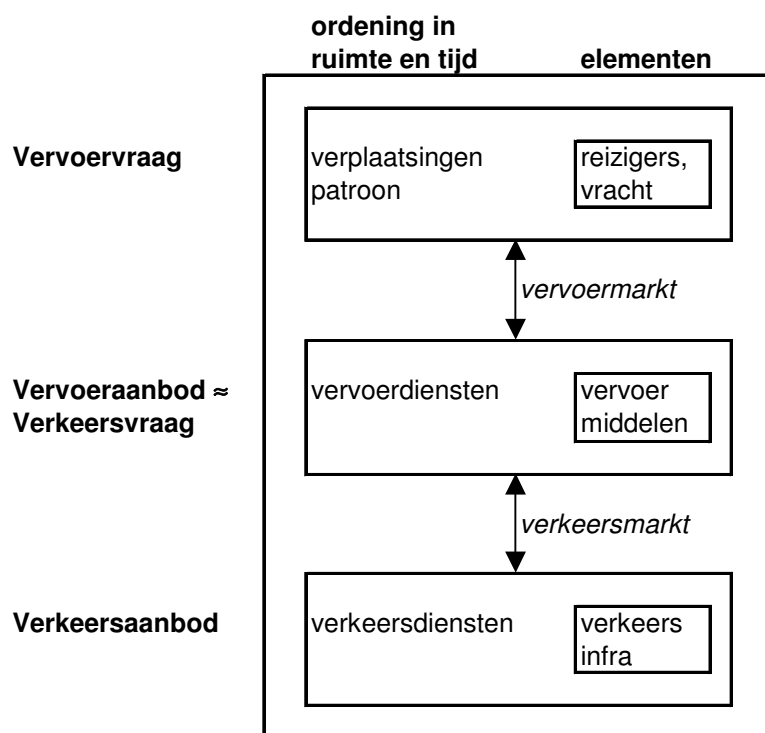
Hoofdstuk 2 Transportnetwerken en netwerkbetrouwbaarheid

2.1 Inleiding

Transportnetwerken komen in allerlei hoedanigheden voor. Er zijn allerlei categorieën netwerken die hun eigen karakteristieken hebben (par. 2.3). Deze netwerken maken verplaatsingen mogelijk binnen het transportsysteem. (par. 2.2) Paragraaf 2.4 bevat de beschrijving van het algemene netwerkontwerpprobleem voor transportnetwerken. Wat zijn de verschillende hoofdtypen van het NOP en waarom is dit probleem zo complex? Hierna wordt de koppeling gemaakt van het algemene netwerkontwerpprobleem naar het NOP voor openbaar vervoer. Daarin is nog weinig aandacht voor betrouwbaarheid en robuustheid. In paragraaf 2.6 komen de definities van betrouwbaarheid en robuustheid voor dit onderzoek naar voren en wordt een koppeling gemaakt van die effecten naar het netwerkontwerpprobleem. (par 2.7)

2.2 Transportsysteem

Het transportsysteem waarin verplaatsingen, vervoerdiensten en verkeersdiensten op elkaar worden afgestemd is te schematiseren als: (figuur 2.1)



Figuur 2.1 Transportsysteem (Bovy et al., 2000)

In het transportsysteem zijn 2 subsystemen verbonden met elkaar, namelijk het vervoer- en het verkeerssysteem.

Het *vervoersysteem* bevat de elementen verplaatsingspatronen, reizigers en vracht, vervoerdiensten, vervoermiddelen. De vraagzijde wordt gevormd door het verplaatsingspatroon en de aanbodzijde door de vervoerdiensten.

Het verplaatsingspatroon en de vervoerdiensten zijn te beschouwen als de ordening in ruimte en tijd van de vraag- en aanbodelementen, dus van respectievelijk reizigers en vracht en van de vervoermiddelen.

Waar sprake is van vraag en aanbod, kan een markt gedefinieerd worden. Dat is in het vervoersysteem de vervoermarkt. (deze is weergegeven in figuur 2.1) De vervoermarkt beschrijft de wisselwerking tussen vervoervraag (verplaatsingen) en vervoeraanbod (vervoermiddelen).

Het *verkeerssysteem* bestaat uit de elementen vervoerdiensten, vervoermiddelen, verkeersdiensten en verkeersinfrastructuur. Deze zijn net als bij het vervoersysteem te onderscheiden naar vraag en aanbodzijde. De vervoerdiensten zijn de vraagzijde en de verkeersdiensten de aanbodzijde.

De vraagzijde van het verkeerssysteem en de aanbodzijde van het vervoersysteem bestaan dus uit de vervoerdiensten. Bij beschouwing van het gehele transportsysteem kunnen deze vraag- en aanbodzijde op elkaar afgestemd worden.

De verkeersdiensten zijn de ordening in ruimte en tijd van de aanbodelementen, namelijk de verkeersinfrastructuur. Eerder zagen we al dat de vervoerdiensten de ordening in tijd en ruimte waren van de vervoermiddelen.

Ook in het verkeerssysteem is dus een markt te definiëren, de verkeersmarkt. Deze beschrijft de wisselwerking tussen verkeersvraag (vervoermiddelen) en verkeersaanbod (beschikbare infrastructuur)

Bij het verder lezen van het rapport worden met verplaatsingen altijd verplaatsingen van reizigers bedoeld (vrachtvervoer valt buiten de scope van dit onderzoek) en bij vervoerdiensten is dus altijd sprake van OV-diensten.

2.3 Transportnetwerken

Om verkeer- en vervoerdiensten in het transportsysteem mogelijk te maken zijn transportnetwerken nodig. Een transportnetwerk is de verzamelnaam voor alle infrastructuur- en OV-dienstennetwerken.

2.3.1 Beschrijving transportnetwerken

Transportnetwerken kunnen op twee manieren worden beschreven.

De meest gebruikelijke methode om een *infrastructuurnetwerk* te beschrijven is als een set van knopen (toegangspunten en knooppunten) en schakels. Elke schakel verbindt één paar knopen. Daarnaast kunnen er nog buffer- en stallingsvoorzieningen voorkomen in het netwerk. Een infrastructuurnetwerk bestaat dus uit de volgende elementen:

- ♣ Toegangspunten
- ♣ Knooppunten
- ♣ Schakels
- ♣ Buffer- en stallingsvoorzieningen

Toegangspunten zijn plaatsen waar vervoermiddelen het infrastructuurnetwerk kunnen binnengaan of verlaten. Voorbeelden zijn: Op- en afritten van autosnelwegen en de oprijlaan voor een huis.

Knooppunten zijn plaatsen waar drie of meer schakels van hetzelfde type infranetwerk bij elkaar komen. Bijvoorbeeld een knooppunt op een snelweg of een splitsing van spoorbanen. *Schakels* zijn de verbindingen tussen de toegangspunten. Hierbij valt te denken aan een stuk weg of een spoortraject.

Buffer- en stallingsvoorzieningen hebben tot doel om voertuigen voor, tijdens of na het gebruik te kunnen bergen of tijdelijk ergens vast te houden. Voorbeelden hiervan zijn remises

voor bussen of trams en opstelruimtes voor verkeerslichten. (dit type elementen speelt verder geen rol in het onderzoek)

Bij *OV-dienstennetwerken* wordt in de meest gebruikte methode het netwerk naast knopen en schakels beschreven aan de hand van lijnen (een set van knopen en schakels) en hun bijbehorende frequenties. *OV-dienstennetwerken* kennen de volgende elementen:

- ♣ Toegangspunten
- ♣ Knooppunten
- ♣ Schakels
- ♣ Lijnen
- ♣ Frequenties

Toegangspunten zijn plaatsen waar reizigers het dienstennetwerk kunnen in- en uitgaan. Voorbeelden hiervan zijn stations en haltes.

Knooppunten zijn toegangspunten waar drie of meer schakels bij elkaar komen. Vaak is in een dienstennetwerk een knooppunt tevens een overstappunt, waar reizigers kunnen overstappen van de ene dienst op de andere dienst of kunnen overstappen van lijn. Een voorbeeld is een (bus)station.

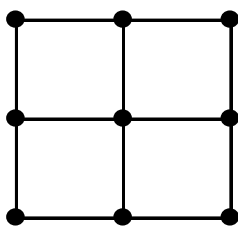
Schakels zijn verbindingen tussen twee toegangspunten, bijvoorbeeld het traject tussen 2 stations of bushaltes.

Lijnen zijn vervoerdiensten die dezelfde toegangspunten en schakels bedienen.

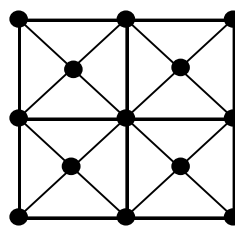
Frequenties geven aan hoe vaak een vervoerdienst per tijdseenheid aangeboden wordt.

Deze eerste beschrijvingsmethode van transportnetwerken is vooral geschikt voor modellering van netwerken en om allerlei transportnetwerken nader te specificeren.

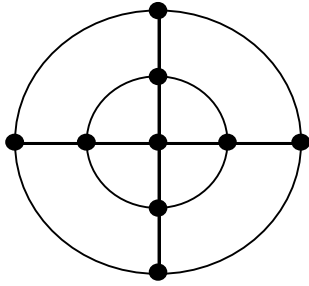
De tweede methode om een transportnetwerk te beschrijven richt zich primair op de netwerkvorm. Dit geldt zowel voor infrastructuur-, als dienstennetwerken. Een aantal voorbeelden van netwerkvormen zijn: de lineaire/grid structuur, de triangulaire structuur, de ring-radiale structuur en de radiale structuur. (figuur 2.2 – 2.5)



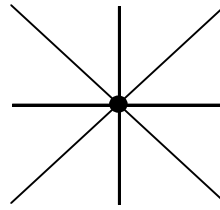
Figuur 2.2 Lineaire/grid structuur



Figuur 2.3 Triangulaire structuur



Figuur 2.4 Ring-radiale structuur



Figuur 2.5 Radiale structuur

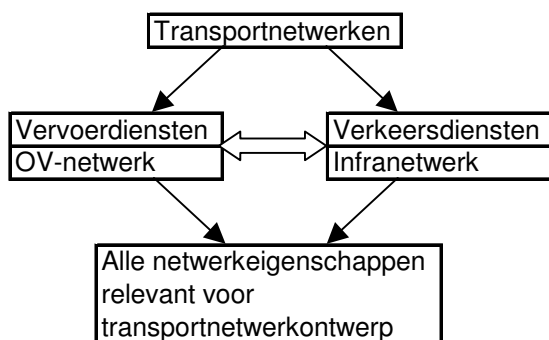
Naast de netwerkvorm gebruikt de tweede beschrijvingsmethode netwerkvariabelen zoals netdichtheid, lijndichtheid, haldedichtheid en frequentie om het netwerk verder te specificeren. Deze netwerkvariabelen bepalen zowel de netwerkeigenschappen voor de gebruiker als voor de investeerder.

Het detailniveau van deze methode qua topologie is beduidend minder dan bij de eerste methode, maar de methode is wel geschikt voor een analyse van de belangrijkste netwerkeigenschappen. Een voorbeeld van zo'n analyse is te vinden in Vaughan (1987).

2.3.2 Netwerkcategorieën

Transportnetwerken maken dus verplaatsingen mogelijk van een herkomst naar een bestemming en bepalen de eigenschappen van die verplaatsing. Transportnetwerken komen terug bij de vervoerdiensten *en* bij de verkeersdiensten.

Dienstennetwerken hebben een directe relatie met infranetwerken. Een busdienst maakt gebruik van het wegennet en een trein van het spoornet. (er zijn uitzonderingen zoals het luchtvaartnetwerk) Vanuit het oogpunt van de gebruiker van openbaar vervoer gezien, is alleen het dienstennetwerk relevant. Daar maakt hij zijn verplaatsing mee. Dit in tegenstelling tot reizigers die met de auto reizen. Zij maken direct gebruik van het infrastructuurnetwerk. Zij verzorgen als het ware hun eigen vervoerdienst. Uit de vervoer- en verkeerdiensten volgen alle netwerkeigenschappen die van belang zijn voor het transportnetwerkontwerp. Voorgaande is samengevat in figuur 2.6:



Figuur 2.6 Transportnetwerken

2.3.3 Eigenschappen van transportnetwerken

Naar eigenschappen van transportnetwerken kan van twee kanten gekeken worden, namelijk vanaf de gebruikerszijde en vanaf de investeerders- of netwerkexploitantzijde. Van de

gebruikerszijde is het belangrijkste criterium de *reistijd* c.q. *de reiskosten*. Deze worden bepaald door netwerkeigenschappen als toegankelijkheid in ruimte, toegankelijkheid in tijd en de verplaatsingssnelheid in het netwerk. Deze eigenschappen zijn hieronder nader toegelicht:

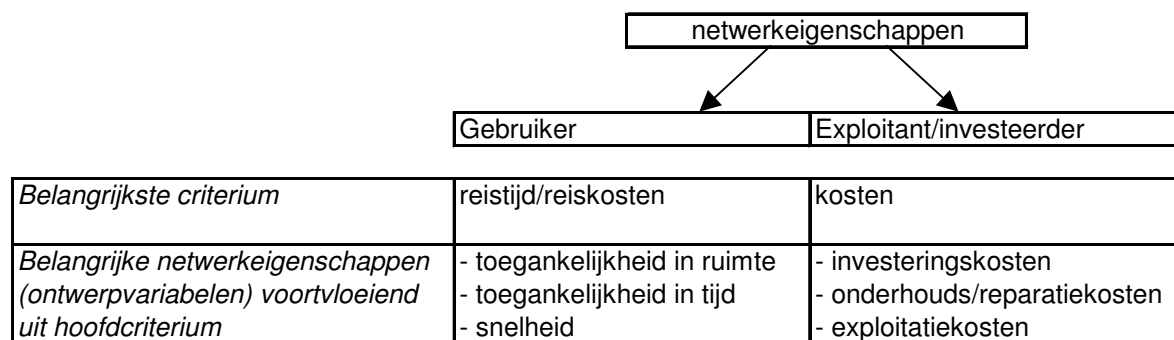
- Toegankelijkheid in ruimte: Dit is het aantal en de verdeling van toegangspunten over het netwerk.
- Toegankelijkheid in tijd: Dit is het aantal mogelijkheden per tijdseenheid dat de reiziger het transportnetwerk kan gebruiken. Deze eigenschap is vooral van belang bij openbaar vervoernetwerken en komt tot uitdrukking in frequentie en dienstregeling. Een infrastructuurnetwerk is normaliter altijd beschikbaar voor gebruik.
- Verplaatsingssnelheid: Dit is de gemiddelde snelheid bij gebruik van het netwerk. De snelheid is afhankelijk van de netwerkstructuur en de ontwerpsnelheid.

Van de *investeerszijde* zijn *kosten* het belangrijkste criterium. Deze kosten zijn in 3 categorieën te onderscheiden:

- Investeringskosten: De kosten die gemoeid zijn met aanleg van de infrastructuur. Die hangen af van het type infrastructuur en de lengte van het netwerk.
- Onderhoudskosten: De kosten voor het in goede staat houden van de infrastructuur. Die hangen af van de lengte van het netwerk.
- Operationele kosten: De kosten die gemaakt worden voor het verzorgen van diensten in een vervoerdienstennetwerk. Deze kosten hangen af van de lengte van het dienstennetwerk en de frequentie van de dienstuitvoering.

Afhankelijk van het type netwerk zijn bepaalde netwerkeigenschappen meer of minder relevant. Bij een busnetwerk bijvoorbeeld komen investerings- en onderhoudskosten vaak voor rekening van de wegbeheerder en niet direct bij de OV-exploitant. Bij een metronetwerk moet de exploitant meestal zelf betalen voor investering en onderhoud van de railinfrastructuur.

De netwerkeigenschappen voor de gebruiker en de exploitant/investeerder zijn samengevat in figuur 2.7.



Figuur 2.7 Eigenschappen van transportnetwerken

2.4 Algemene netwerkontwerpprobleem

Hoofdeigenschappen en definitie

De definitie van het netwerkontwerpprobleem is: Een transportnetwerk ontwerpen met een optimale prestatie gegeven een bepaalde doelfunctie en randvoorwaarden.

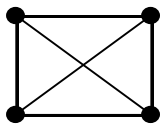
De *ontwerpvariabelen* bepalen de karakteristieken en de lay-out van het netwerk. Wat de ontwerpvariabelen zijn, hangt af van de methode die men kiest om het netwerk te beschrijven. (zie 2.3.1) In dit onderzoek is gekozen voor de eerste beschrijvingsmethode waarbij de ontwerpvariabelen de knopen en schakels in het netwerk zijn en bij een OV-netwerk komen de lijnen en frequenties daarbij. De tweede methode is verder buiten beschouwing gelaten.

Mogelijke *doelfuncties* voor het NOP zijn: min. totale kosten, max. welvaart, max. directe verplaatsingen. De uitkomst van de doelfunctie bepaalt de prestatie van het netwerk.

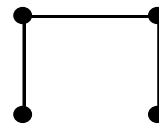
Mogelijke *randvoorwaarden* voor het netwerkontwerpprobleem zijn: Vast budget, toegangspunten hoger orde netwerk. De randvoorwaarden bepalen de ontwerpruimte.

Vaak liggen bij het ontwerpprobleem de knopen van het transportnetwerk al vast omdat men de lokaties die men wil verbinden al bepaald heeft. Zodoende is het alleen de vraag *hoe* deze knopen met elkaar verbonden moeten worden.

Een voorbeeld van een netwerkontwerpprobleem is een set van 4 gegeven knopen die met elkaar verbonden moeten worden. Dan zijn er 6 kandidaat schakels (zie figuur 2.8) die gebruikt kunnen worden om het probleem op te lossen waarvan er minimaal 3 nodig zijn om volledige verbondenheid te krijgen. (zie figuur 2.9) Deze figuur is slechts één van de vele mogelijkheden om de 4 knopen met elkaar te verbinden. Dat zegt iets over de complexiteit van het netwerkontwerpprobleem.



Figuur 2.8 Alle kandidaatschakels



Figuur 2.9 Min. aantal schakels voor volledige verbondenheid

De complexiteit van een openbaar vervoernetwerk is nog groter. Dan komen er extra ontwerpvariabelen bij, namelijk de routes van de lijnen door het netwerk met bijbehorende frequenties.

Hoofdtypen netwerkontwerpprobleem

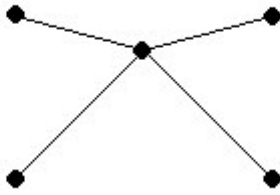
Er zijn 2 hoofdtypen netwerkontwerpproblemen te onderscheiden:

- ♣ Een nieuw transportnetwerk ontwerpen. Hier zijn twee differentiaties voor mogelijk. De eerste is dat de toegangspunten nog *niet* bekend zijn. De tweede differentiatie is dat de set met toegangspunten *wel* bekend is. In beide gevallen moeten de toegangspunten door middel van nieuwe schakels met elkaar verbonden worden. Dit zijn fysieke schakels zoals wegen in het geval van een infrastructuurnetwerk of lijnen zoals buslijnen in het geval van een OV-netwerk.
- ♣ Een bestaand netwerk verbeteren. Niet alleen een set van toegangspunten is gegeven, maar een geheel netwerk. De vraag is dan of er nieuwe schakels toegevoegd of bestaande schakels verwijderd moeten worden. Wellicht is de capaciteit van schakels of de kwaliteit van de aangeboden dienst ook aan verbetering toe. Soms kan het ook een ontwerpvraag zijn of er nieuwe *knopen* toegevoegd of bestaande *knopen* verwijderd moeten worden.

Aspecten die de complexiteit van het NOP vergroten

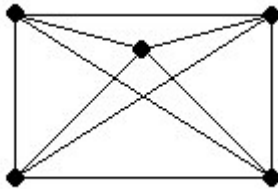
Naast de veelheid aan oplossingen van het netwerkontwerpprobleem voor OV zijn er nog twee aspecten die de complexiteit van het NOP vergroten.

Het *eerste* aspect behelst het conflict tussen de opdrachtgever en de gebruiker. De opdrachtgever tracht de kosten zo laag mogelijk te houden hetgeen resulteert in een netwerk met een minimaal aantal schakels en een minimale beschikbaarheid naar tijd. (figuur 2.10)



Figuur 2.10 Optimum voor de opdrachtgever (minimale kosten, minimaal aantal diensten)

De gebruiker van het netwerk wenst echter zo veel mogelijk directe verbindingen tussen alle knopen zodat een verdicht netwerk ontstaat. (Figuur 2.11) En als beschikbaarheid naar tijd een rol speelt, is het ideaal voor de gebruiker om ook op elk tijdstip over vervoer te kunnen beschikken.



Figuur 2.11 Optimum voor de gebruiker (maximale schakeldichtheid, maximaal aantal diensten)

Beide oplossingen zijn optimaal vanuit het oogpunt van één partij gezien en niet optimaal voor de andere partij. Omdat beide partijen relevant zijn, zal het ontwerpprobleem een balans moeten vinden tussen deze twee tegenstrijdige belangen. Er zijn 3 methodes om tot een oplossing van dit probleem te komen:

- 1 Methode met een doelfunctie die beide belangen meeneemt. Een gebruikelijke manier hiervoor is om het probleem te bekijken vanuit het perspectief van de overheid die een afweging maakt tussen de belangen van zowel de reiziger als de investeerder. Hij kan economische principes zoals totale welvaart of totale kosten gebruiken om een afweging te maken.
- 2 Methode die focust op het belang van de reiziger en die het belang van de investeerder meeneemt als randvoorwaarde, bijvoorbeeld het beschikbare budget. Het is echter niet in alle gevallen duidelijk hoe groot het budget is. Een nadeel met budget als randvoorwaarde is dat het geen inzicht geeft in de trade-off tussen de kosten voor de investeerder en de voordelen voor de reiziger.
- 3 Methode die focust op het belang van de investeerder en die rekening houdt met het gedrag van de reiziger. Een voorbeeld van deze methode is een OV-exploitant die zijn opbrengsten probeert te maximaliseren rekening houdend met het feit dat het aanbieden van slechte of weinig diensten de voertuigbezetting niet ten goede komt en dus de opbrengsten reduceert. Bij deze methode zit dus wel een trade-off tussen investeerder en gebruiker.

Deze methodes zijn samengevat in tabel 2.1:

Methodes	Formulering
1 Beide belangen meenemen	$D = f(P,R) + g(K_n)$
2 Focus op belang reiziger, gegeven een budget	$D = f(P,R)$ gegeven K_n
3 Focus op belang investeerder, gegeven reisgedrag	$D = g(K_n(f(P,R)))$

D : Doelfunctie, P : Vraag, R : Reiskwaliteit, K_n : Netwerkkosten

Tabel 2.1 Formulering methodes om belangen reiziger en investeerder af te wegen

Het *tweede* aspect dat de complexiteit van het netwerkontwerpprobleem vergroot, is het feit dat reisgedrag sterk afhangt van de kenmerken van transportnetwerken. Veranderingen in het netwerk leiden tot een verandering in de routes die reizigers kiezen. En door veranderd reisgedrag is het misschien weer noodzakelijk om het netwerk aan te passen.

Men kan het netwerkontwerpprobleem zien als een Stackelberg-game waarin de netwerkontwerper volledige kennis heeft van de keuzes die de reiziger maakt zodat hij daar rekening mee kan houden bij het optimaliseren van zijn eigen belangen. In figuur 2.12 is een Stackelberg-game weergegeven.



Figuur 2.12 Stackelberg-game / bilevelprobleem

In een Stackelberg-game valt het netwerkontwerpprobleem uiteen in twee delen:

- Het bovenste gedeelte is het netwerkontwerpprobleem waar gegeven een bepaalde doelfunctie en gegeven het verwachte gebruik van de reizigers de optimale netwerkeigenschappen bepaald worden;
- Het onderste gedeelte beschrijft het gedrag van de reizigers gegeven het aangeboden netwerk. Elke reiziger probeert zijn individuele nut te maximaliseren.

Oplosmethodieken voor het algemene transportnetwerkontwerpprobleem

Vaak worden beide niveaus van de Stackelberg-game apart geformuleerd als een optimalisatieprobleem. Deze opdeling laat het probleem uiteenvallen tot een bilevel-optimalisatieprobleem.

Vanwege de complexiteit van het transportnetwerkontwerpprobleem hebben al vele wetenschappers zich bezig gehouden met het vinden van methodieken om dit probleem op te lossen en te zoeken naar (sub)optimale uitkomsten. Deze methodieken variëren van wiskundige methodes zoals branch-and-bound technieken tot heuristische zoekmethodes die bijvoorbeeld genetic algorithms gebruiken. (zie o.a. Magnanti en Wong, 1984, Yang en Bell, 1998, Xiong en Schneider 1992, 1995)

2.5 Netwerkontwerpprobleem voor openbaar vervoer en ‘de missende schakel’ daarin

In dit onderzoek is het te ontwerpen netwerk een openbaar vervoersysteem. Dat maakt het ontwerpprobleem, zoals eerder gezien, lastiger. Het netwerkontwerpprobleem richt zich dan namelijk niet alleen op het ontwerpen van nieuwe knopen en schakels maar ook op de keuze van lijnen, de toewijzing van lijnen aan schakels, en de keuze van frequenties. Op dit terrein zijn al veel onderzoekers bezig geweest om goede oplosmethodieken voor dit gecompliceerde probleem te vinden. Een aantal voorbeelden daaruit zijn (van Nes, 1988):

- ♣ Modellen die lijnen toewijzen aan schakels zonder de frequentie van die lijnen mee te nemen (Pierick en Wiegand, 1976; Simonis, 1981)
- ♣ Modellen die frequenties toewijzen aan een gegeven set van lijnen (Scheele, 1982; Furth en Wilson, 1981; Hagberg en Hasselström, 1980)
- ♣ Modellen die eerst de lijnen toewijzen en in de tweede stap de frequenties aan die lijnen toekennen (Lampkin en Saalmans, 1967; Dubois et al., 1979)
- ♣ Modellen die tegelijkertijd lijnen en frequenties meenemen (Hasselström, 1979)

Echter komt nergens bij het oplossen van het OV-netwerkontwerpprobleem het kenmerk 'betrouwbaarheid' of 'robuustheid' voor. Tegenwoordig is dit een zeer actueel thema in de gehele verkeer- en vervoersector. Er valt bijvoorbeeld te denken aan de vele congestie op de Nederlandse wegen. De tijd en de zekerheid om van A naar B te reizen is niet meer zo eenduidig. Daar zit een grote mate van onzekerheid in.

Dit is evenzo van toepassing op het openbaar vervoernetwerk. Het komt regelmatig voor dat een trein uitvalt of dat een trein vertraging heeft.

De noodzaak is er dus om niet alleen zorg te dragen voor kwalitatief goed en snel openbaar vervoer maar ook voor betrouwbaar openbaar vervoer. Het kan misschien verstandiger zijn om te investeren in een kortsluitschakel in een netwerk zodat er bij een verstoring een alternatieve route beschikbaar is dan dat er geïnvesteerd wordt in weer een nieuwe OV-lijn of modernere voertuigen.

In ieder geval zijn betrouwbaarheid en robuustheid aspecten die zeker meegenomen moet worden bij het ontwerpen van transportnetwerken. De vraag is hoe dat moet gebeuren. Dit onderzoek geeft daar invulling aan.

2.6 Robuustheid en betrouwbaarheid van een transportnetwerk

In deze paragraaf worden de netwerkkenmerken, robuustheid en betrouwbaarheid, gedefinieerd voor dit onderzoek. Reeds verschenen artikelen over robuustheid en betrouwbaarheid van transportnetwerken worden hierbij gebruikt.

2.6.1 Robuustheid van een transportnetwerk

Bell (1999) en Yamada et al. (2004) definiëren de verbondenheid van het netwerk als een onderdeel van de netwerkbetrouwbaarheid. (Bell en Yamada hebben wegennetwerken geanalyseerd, maar voor definities van robuustheid en betrouwbaarheid geeft dit geen verschil met een OV-netwerk) Dat deel van de netwerkbetrouwbaarheid, verbondenheid van het transportnetwerk, is in dit onderzoek gedefinieerd als de robuustheid van het netwerk. Die definitie uit de literatuur luidt als volgt:

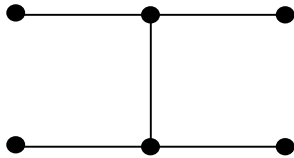
De robuustheid van een transportnetwerk is de kans om van een herkomst naar een bestemming te kunnen reizen.

Een meer algemene definitie van *robuustheid* is:

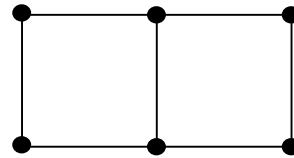
De bekwaamheid van een object om gedurende een tijdsperiode een bepaalde functie uit te voeren.

Het *object* in de definitie is een transportnetwerk en de *functie* is de verplaatsing tussen een herkomst en een bestemming. Zolang het transportnetwerk deze functie uit kan voeren, dus deze verplaatsing mogelijk kan maken, is het netwerk robuust.

In figuur 2.13 en 2.14 zijn voorbeelden weergegeven van respectievelijk een netwerk dat niet robuust is en een netwerk dat wel robuust is. Het eerste netwerk is niet robuust omdat het een minimaal aantal schakels heeft. Als er een schakel uitvalt, zijn een aantal knopen direct niet meer verbonden met elkaar. Het tweede netwerk is wel robuust, omdat de knopen altijd verbonden blijven met elkaar als er willekeurig in het netwerk een schakel uitvalt. Pas als er 2 of meer schakels uitvallen, kan dat een verminderde verbondenheid betekenen voor het tweede netwerk.



Figuur 2.13 Niet robuust netwerk



Figuur 2.14 Robuust netwerk

Een indicator voor de robuustheid van een transportnetwerk is het aantal niet gemaakte verplaatsingen. Als een herkomst en een bestemming namelijk niet met elkaar verbonden zijn, kan de desbetreffende verplaatsing niet gemaakt worden. De robuustheid van het netwerk komt pas aan de orde als er sprake is van een verstoring van het aanbod van infrastructuur of van diensten. In een onverstoorde situatie zal ook een niet-robust netwerk namelijk goed functioneren.

2.6.2 Betrouwbaarheid van een transportnetwerk

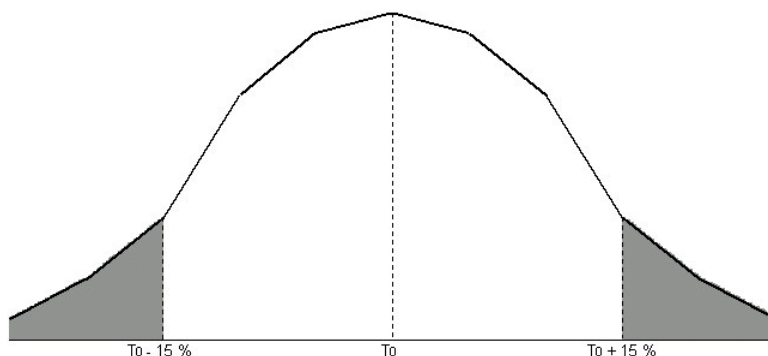
Naast de verbondenheid van het netwerk definiëren Bell (1999) en Yamada et al. (2004) als 2^e onderdeel van de netwerkbetrouwbaarheid hetgeen in dit onderzoek gedefinieerd is als betrouwbaarheid van een transportnetwerk. De definitie van Yamada et al. luidt:

De betrouwbaarheid van een transportnetwerk is de kans dat een bestemming te bereiken is binnen een bepaalde tijd.

Deze definitie heeft het dus alleen over variatie in reistijd naar boven toe. Een route die veel korter is dan normaal, is geen probleem volgens Yamada et al.

Bell heeft dit aspect wel meegenomen en definieert (on)betrouwbaarheid als onacceptabele variatie in reistijd tussen herkomsten en bestemmingen.

Duidelijk is in ieder geval dat betrouwbaarheid om variatie in reistijd boven een bepaalde norm gaat. Een voorbeeld hiervan is te zien in figuur 2.13 waarbij de norm in variatie van de reistijd op 15 % is gesteld. Het grijze gedeelte van de verplaatsingen overschrijdt deze norm. Het betrouwbaarheidsinterval loopt van $T_0 - 15\%$ tot $T_0 + 15\%$.



Figuur 2.13 Reistijd van de verplaatsingen met vastgesteld betrouwbaarheidsinterval

De algemene definitie van betrouwbaarheid voor dit onderzoek luidt: (zie ook Yin & Ieda, 2002):

De bekwaamheid van een object (verlangd door een bepaald subject) om gedurende een tijdsperiode een functie met bepaalde kwaliteit uit te voeren.

Het *object* is net als bij de definitie van robuustheid een transportnetwerk. De *functie* is de verplaatsing tussen een herkomst en een bestemming. De *kwaliteit* houdt een bepaalde reistijd in die binnen het vastgestelde betrouwbaarheidsinterval valt. Dit betrouwbaarheidsinterval hangt af van het *subject* dat een bepaalde mate van betrouwbaarheid verlangt. De netwerkplanner, de OV-exploitant of de gebruiker hebben allemaal hun eigen kwaliteitseisen ten aanzien van de betrouwbaarheid.

Dit onderzoek kijkt naar de betrouwbaarheid van de reisduur van een verplaatsing voor de netwerkplanner.

Indicatoren voor de betrouwbaarheid zijn het *reistijdverlies* (som van de reistijd die langer is dan de ongestoorde reistijd over alle verplaatsingen) en het *aantal verplaatsingen* dat een reistijd heeft die groter is dan een vastgestelde norm. In dit onderzoek zijn beide indicatoren bekeken om een compleet beeld te verkrijgen van de betrouwbaarheid. Het aantal verplaatsingen dat een reistijd heeft groter dan een vastgestelde norm zegt namelijk nog niets over de grootte van die overschrijding. Dat aspect komt wel terug in het reistijdverlies. Een ander argument voor analyse van beide indicatoren is dat bij analyse van het aantal normoverschrijdingen van de reistijd alleen afwijkingen boven de norm worden meegeteld. Kleine overschrijdingen van de reistijd worden niet bijgehouden. Dit kunnen er echter wel veel zijn en dat geeft ook een onbetrouwbaar netwerk. Door beide indicatoren te analyseren, ontstaat dus een completer beeld.

Hieronder staat de mathematische weergave van berekening van het reistijdverlies ($\underline{R}$) en van de normoverschrijding ($\underline{N}$) van het betrouwbaarheidsinterval van 15 % van de reisduur.

$$\underline{R} = \sum_i \sum_j \sum_t \underline{U}_{ijt} \cdot |t_{ijt} - t_{ij}^0| \quad \forall i, j, t$$

$$\underline{N} = \sum_i \sum_j \sum_t \underline{U}_{ijt} \quad \forall \underline{U}_{ijt} \text{ waarvoor geldt dat } t_{ijt} < 0,85 * t_{ij}^0 \vee t_{ijt} > 1,15 * t_{ij}^0$$

$\underline{U}_{ijt}$ = het aantal verplaatsingen van herkomst i naar bestemming j per tijdseenheid t

t_{ij}^0 = de kortste tijd om van herkomst i naar bestemming j te komen in de uitgangssituatie

t_{ijt} = de kortste tijd om van herkomst i naar bestemming j te komen gedurende de simulatie

2.7 Koppeling robuustheid en betrouwbaarheid naar het netwerkontwerpprobleem

Robuustheid en betrouwbaarheid worden nauwelijks meegenomen in het netwerkontwerpprobleem voor transportnetwerken. Het is dus onbekend hoe groot het effect op het netwerkontwerp is als er *wel* rekening gehouden wordt met criteria als robuustheid en betrouwbaarheid. Dit onderzoek levert een bijdrage om dat effect te onderzoeken.

Als het effect bekend is op het functioneren van het netwerkontwerp, dan is een logische vervolgvraag *hoe* netwerkbetrouwbaarheid verdisconteerd kan worden in het netwerkontwerpprobleem. Er kan gedacht worden aan een nieuwe doelfunctie die één van beide criteria of een combinatie van beide optimaliseert. Ook kan een bepaalde mate van robuustheid en betrouwbaarheid als harde eis in een randvoorwaarde verwerkt worden.

In het volgende hoofdstuk wordt verder ingegaan op de vraag wat de verstoringen in het transportsysteem in dit onderzoek zijn waardoor betrouwbaarheid en robuustheid relevantie krijgen.

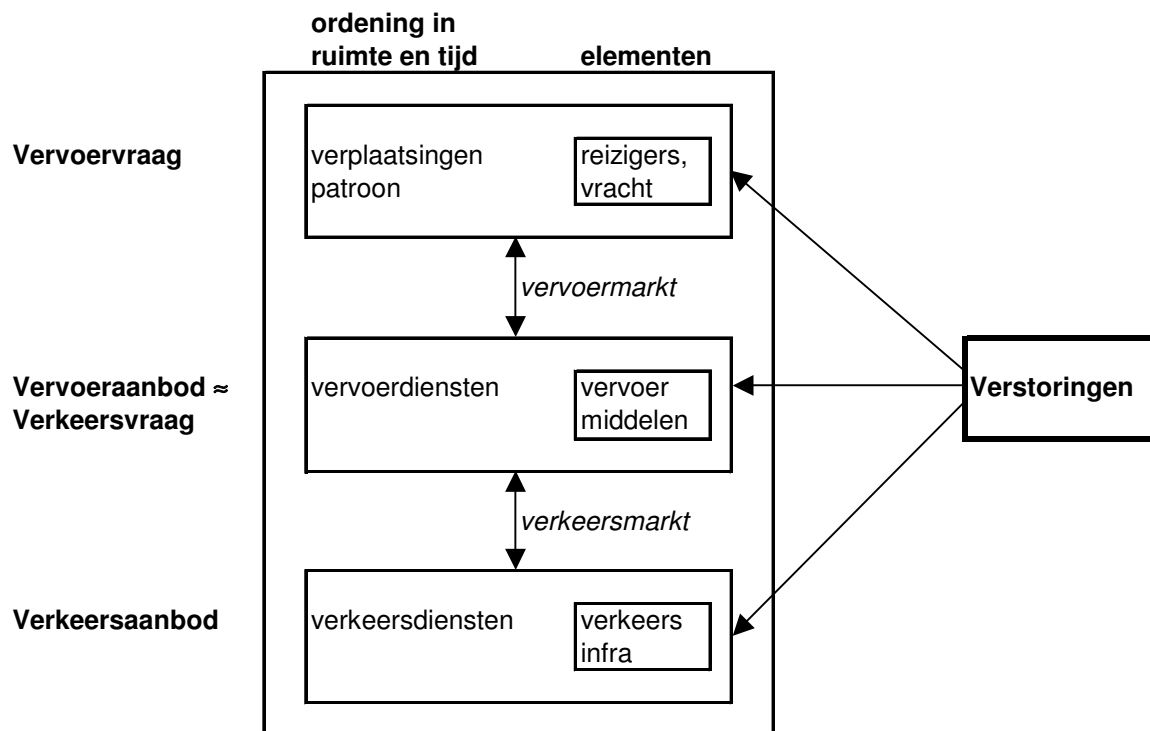
Hoofdstuk 3 Verstoringen transportsysteem en afbakening/opzet onderzoek

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk komen de verstoringen aan de orde die aangrijpen op het transportsysteem aan de orde waarbinnen het onderwerp van deze studie valt. (par.3.2) Een deel van deze verstoringen wordt in dit onderzoek geanalyseerd. (par. 3.3) Dit is tevens de afbakening van het onderzoek. De overige verstoringen zijn namelijk buiten beschouwing gelaten. Uit de afbakening van het onderzoek volgen de probleemschets, doelstellingen en de opzet van dit onderzoek. (par. 3.4 – 3.6)

3.2 Verstoringen in het transportsysteem

Het transportsysteem is dus een samenvoeging van het verkeer- en vervoersysteem en kent drie niveaus. Op elk van die niveaus zijn *verstoringen* aanwezig. (zie figuur 3.1) Het transportsysteem is namelijk geen 'ideaal systeem' waarin alle omstandigheden altijd gelijk zijn.



Figuur 3.1 Transportsysteem met onzekerheden

Door de verstoringen is er een onvoorspelbare variatie aanwezig in veel componenten van het transportsysteem. Een aantal voorbeelden van verstoringen op de verschillende niveau's van het transportsysteem zijn in figuur 3.2 weergegeven. Er is onderscheid gemaakt in verstoringen die intern aangrijpen en in verstoringen die van buiten het transportsysteem komen. Interne verstoringen zijn meer voorspelbaar en daar kan vaak bij het plannen al wat rekening mee worden gehouden terwijl externe verstoringen meer onbekend zijn en grillig in mate van optreden zijn.

Verstoringslagen	Intern	Extern
Verplaatsingspatroon	variatie in volume variatie over de tijd	evenementen epidemie
Vervoerdiensten	variatie in rittijd kapot voertuig	stroomuitval staking personeel
Verkeersdiensten	congestie hinder overig verkeer	brugopening ongeval

Figuur 3.2 Verstoringen in de verschillende lagen van het transportsysteem

Een verstoring die op alle componenten van het transportsysteem aangrijpt, is de invloed van het *weer*. Weer zorgt namelijk voor een ander verplaatsingspatroon doordat mensen besluiten een verplaatsing niet te maken en thuis te blijven. De vervoerdiensten ondervinden hinder van het weer door gladde wegen of harde wind. En de verkeersdiensten kunnen overlast krijgen doordat wegen onderlopen of door afgewaaidе takken.

In de volgende paragraaf is een keuze gemaakt om één type verstoringen te onderzoeken.

3.3 Afbakening onderzoek

Tot nu toe is gesproken over de verzamelnaam van infrastructuurnetwerken en vervoerdienstennetwerken, de transportnetwerken. In dit onderzoek is gekozen om openbaar vervoerdienstennetwerken te analyseren. En dan met name de *stedelijk openbaar vervoerdienstennetwerken*. In een stad spelen veel meer verstoringen een rol dan daarbuiten. Denk alleen maar aan de vele conflictpunten die het stedelijk openbaar vervoer heeft. (als het niet van een vrije baan gebruik maakt) Daarnaast ontstaan er als gevolg van hogere verkeersintensiteiten en grotere menging van vervoersoorten en vervoerstromen meer verstoringen.

Bij dit onderzoek wordt alleen gekeken naar de verstoringen in de *verkeersdiensten*. De verstoringen in de vraag en in de vervoerdiensten zijn buiten beschouwing gelaten. De vraag (*P*) en de vervoerdiensten (*V*) zijn constant aangenomen over ruimte en tijd. De beschikbaarheid van de infrastructuur (de verkeersdiensten) in dit onderzoek is echter stochastisch. (*I*)

In de vorige paragraaf is een aantal interne en externe verstoringen genoemd waar verkeersdiensten mee te maken hebben. De meeste verstoringen bij verkeersdiensten ontstaan als gevolg van externe factoren, dus van buiten het transportsysteem. Dit maakt ze voor een netwerkplanner moeilijk beheersbaar. In dit onderzoek bekijken we hoe groot het effect is van die verstoringen op de vervoerdienst. De vervoerdiensten staan dus in het middelpunt van dit onderzoek. De verstoringen grijpen aan op het infrastructuurnetwerk, maar werken door op het dienstennetwerk alwaar het effect heeft voor de exploitant van het netwerk en voor de reizigers die gebruik maken van dat dienstennetwerk.

Aangezien de vervoerdiensten centraal staan in het onderzoek, hebben we ons puur beperkt tot de vraag of de infrastructuur die gebruikt wordt door de vervoerdiensten beschikbaar is en als dat het geval is, dan kan de vervoerdienst plaatsvinden. De kwaliteit die geboden wordt door de infrastructuur is buiten beschouwing gelaten, dus ook de factoren die de kwaliteit van de infrastructuur beïnvloeden zoals congestie.

Stedelijk openbaar vervoer kent verschillende vervoertechnieken. Dat kan een metro, bus of tram zijn en in sommige gevallen light-rail of zelfs een trein. Tussen de vervoertechnieken zitten belangrijke verschillen met betrekking tot het netwerkontwerpprobleem. Zo is er een verschil in netdichtheid van het infrastructuurnetwerk dat ze gebruiken. Er zijn verschillen in flexibiliteit van de dienstuitvoering. En de frequenties van de verschillende stedelijke OV-diensten verschillen.

Dit zijn een aantal verschillen, maar het geeft aan dat het effect van verstoringen op het dienstennetwerk en dus het effect voor kosten en voor gebruikers hoogstwaarschijnlijk verschilt per vervoertechniek. Daarom is in dit onderzoek gekozen om twee vervoertechnieken te vergelijken met elkaar qua effecten van de verstoringen. Gekozen is om weg- en railtechniek te vergelijken vormgegeven door een *bus- en een tramsysteem*. Deze twee systemen verschillen vooral op het punt van netdichtheid van het infranet dat ze gebruiken en op het punt van flexibiliteit van de dienstuitvoering. De dichtheid van het infranet is voor een bus groter dan voor een tram en een bus heeft meer uitwijk- en omrijmogelijkheden dan een tram. Hierdoor verwachten we dat het bussysteem minder gevoelig is voor verstoringen dan het tramsysteem.

In hoofdstuk 4 zal verder ingegaan worden op de verschillen en overeenkomsten tussen een bus- en een tramsysteem.

3.4 Probleemschets van het onderzoek

Op dit moment worden netwerkeigenschappen als robuustheid en betrouwbaarheid nauwelijks meegenomen bij het netwerkontwerpprobleem terwijl er wel veel verstoringen in alle delen van het transportsysteem aanwezig zijn. (zie par. 3.2) Het is niet bekend wat al die verstoringen zijn en wat de grootte ervan is.

In dit onderzoek ligt de aandacht bij de verstoringen in de verkeersdiensten. Voorbeelden hiervan zijn: brugopening, weersinvloeden en hinder door overig verkeer. Door de verstoringen varieert de beschikbaarheid van verkeersdiensten in het netwerk. Wat het effect hiervan is op de kosten, gebruik en ontwerp van het dienstennetwerk is nog onbekend. Onder effecten voor kosten en gebruik van het netwerk vallen ook de effecten voor de robuustheid en de betrouwbaarheid van het dienstennetwerk.

Als netwerk is gekozen voor een stedelijk openbaar vervoersysteem omdat er in de stad meer verstoringen optreden dan daar buiten. Binnen het stedelijk OV-systeem zijn er verschillende vervoertechnieken die onderling verschillen in flexibiliteit van het dienstennetwerk, frequentie en dichtheid van het infranet. Deze verschillen spelen een rol met betrekking tot de gevoeligheid van het systeem voor verstoringen. Maar hoe groot die verschillen zijn in gevoeligheid, is onbekend. Tevens weten we niet wat de verschillen tussen vervoertechnieken in effecten van de verstoringen voor kosten, gebruik en ontwerp van een dienstennetwerk zijn.

3.5 Doelstellingen/onderzoeksvragen van het onderzoek

Gezien de onbekendheid van mogelijke verstoringen en de effecten daarvan op het dienstennetwerk luidt de *centrale vraag* voor dit onderzoek als volgt:

Hoe dient het netwerkontwerp van stedelijk openbaar vervoer te worden aangepast als gevolg van verstoringen in de beschikbaarheid van infrastructuur?

Hiervoor is het noodzakelijk dat we het *effect* van de *verstoringen* op de *kosten* en het *effect* voor de *reiziger* te weten komen bij een gegeven netwerkstructuur.

Tevens vergelijken we twee vervoertechnieken, rail- en wegtechniek vormgegeven door een tram- en een bussysteem om het verschil in flexibiliteit van de dienstuitvoering en het verschil in infranetdichtheid te analyseren en te onderzoeken wat dat verschil voor effect oplevert voor het gebruik, de kosten en het ontwerp van het dienstennetwerk.

Om bovenstaande doelstellingen te realiseren en een antwoord te kunnen geven op de centrale vraag, zijn de volgende onderzoeksvragen geformuleerd:

- 1 Welke factoren zorgen voor verstoringen in de verkeersdiensten?
- 2 Hoe vaak komen de verstoringen voor en wat is de duur ervan?
- 3 Wat is de impact van de verstoringen op het infra- en dienstennetwerk?
- 4 Wat is het meest robuuste netwerk, dus het netwerk met de minste niet gemaakte verplaatsingen?
- 5 Wat is het meest betrouwbare netwerk? (bijv. bij welk netwerk de reistijd het minste varieert)
- 6 Hoe is de verdeling van de totale kosten naar reiskosten, exploitatiekosten en kosten voor niet gemaakte verplaatsingen (zowel in de onverstoorde als verstoorde situatie)
- 7 Wat is het netwerk met de minimale totale kosten (optimum voor de overheid), minimale reiskosten (optimum gebruiker) en minimale exploitatiekosten (optimum exploitant)?
- 8 Is op basis van kosten, robuustheid en betrouwbaarheid een netwerkontwerp aan te wijzen dat het beste is?
- 9 Hebben verstoringen in de beschikbaarheid van infrastructuur een verschillend effect op het dienstennetwerk van rail- en wegvervoer door een verschil in flexibiliteit dat bestaat tussen beide vervoertechnieken?

3.6 Opzet onderzoek

In het volgende hoofdstuk worden de factoren opgesomd die kunnen leiden tot verstoringen in de beschikbaarheid van infrastructuur. Deze factoren worden beschreven en er is een keuze gemaakt welke factoren meegenomen worden in dit onderzoek en welke daarbuiten vallen.

Uit deze factoren volgen de verstoringen voor het infranetwerk. Deze verstoringen hebben een bepaalde impact op het infra- en dienstennetwerk die vastgesteld moet worden.

Hoofdstuk 5 beschrijft de ontwerpzet waarin de verstoringen verdisconteerd kunnen worden. Uit deze ontwerpzet is een model ontwikkeld waarmee de effecten van wisselende beschikbaarheid van infrastructuur op de kosten en voor het gebruik van een netwerk berekend kunnen worden. De effecten zijn bestudeerd door vergelijking van netwerkvarianten waarin gevarieerd wordt met de structuur van het dienstennetwerk en met de verstoringen van de infrastructuur. De effecten voor de kosten komen tot uitdrukking in de reiskosten, kosten voor niet gemaakte verplaatsingen en exploitatiekosten. De effecten voor

het gebruik van het netwerk worden bepaald door de robuustheid en de betrouwbaarheid van het netwerk. De effecten voor gebruik en kosten bepalen samen het effect voor het netwerkontwerp.

In hoofdstuk 7 volgen de resultaten en conclusies van de analyse. Daar vindt ook een gevoeligheidsanalyse met de belangrijkste parameters plaats en zijn er scenario's gemaakt waarin bepaalde typen verstoringen vaker optreden dan normaal. Met de gevoeligheidsanalyse wordt de invloed van een parameter op de uitkomst bepaald. De scenario's geven aan wat er in de toekomst kan gebeuren als een bepaald type verstoring vaker optreedt.

Hoofdstuk 4 Verstoringen in de beschikbaarheid van infrastructuur

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt dieper ingegaan op de verstoringen in de beschikbaarheid van infrastructuur. Allereerst is vastgesteld wat mogelijke factoren kunnen zijn die zorgen dat de infrastructuur niet altijd beschikbaar is (par. 4.2). Uit deze factoren kunnen de verstoringen afgeleid worden. In paragraaf 4.3 is een keuze gemaakt welke verstoringen geanalyseerd worden in de analyse. Paragraaf 4.4 beschrijft de verschillen en overeenkomsten van de twee te onderzoeken vervoertechnieken, weg- en railtechniek vormgegeven door een bus- en een tramsysteem.

4.2 Factoren die tot verstoringen in de verkeersdiensten leiden

Welke factoren zorgen ervoor dat infrastructuur tijdelijk niet beschikbaar is in een stedelijk OV-systeem? Deze zijn eerst kort opgesomd waarna een uitgebreidere toelichting volgt. De toelichting bevat voor iedere factor een beschrijving van het feit (wat gebeurt er, en welke eigenschappen beïnvloeden de ernst van de verstoring?) en daarna een beschrijving van de invloed van de verstoring op het infra- en dienstennetwerk van een bus- en een tramsysteem.

Mogelijke factoren die tot verstoringen leiden:

- 1 Hinder door overig verkeer
- 2 Bruggen
- 3 Ongevallen
- 4 Weersinvloeden
 - Wind
 - Regen
 - IJzel
 - Sneeuw
 - Onweer
- 5 Onderhoudswerkzaamheden aan de infrastructuur

1 Hinder door overig verkeer

Hinder door overig verkeer kan bijvoorbeeld een inparkerende auto zijn, verkeer op een voorrangsweg waaraan voorrang verleend moet worden of een vrachtwagen die zijn lading lost. Allerhande *kleine* zaken waarvan de dienstuitvoering van een bus- of een tramsysteem hinder van kan ondervinden.

Een OV-systeem in een stad heeft altijd te maken met veel ander verkeer tenzij het een volledig vrije baan heeft zoals bij een trein- of een metrosysteem. Een bus en een tram echter ondervinden wel hinder van overig verkeer. Een bus maakt zelfs deel uit van het wegverkeer tenzij hij op een vrije busbaan rijdt.

Belangrijke vraag bij hinder door overig verkeer bij een bussysteem is in *welk deel* van het infrastructuurnetwerk de bus zijn rit maakt. In het centrum van de stad bijvoorbeeld is het drukker dan daar buiten. Ook het *type weg* speelt een rol bij de hinder door het andere verkeer. Maakt een bus gebruik van een smalle woonstraat met geparkeerde auto's of rijdt hij over een breed opgezette gebiedsontsluitingsweg?

Een tram *kan* deel uitmaken van het wegverkeer als de trambaan volledig in de rijbaan ligt. Maar een trambaan kan ook vrij liggen of een geheel eigen baan hebben. Dit laatste is het geval bij een sneltram, dan zijn er ook slagbomen aanwezig op kruisingen die zorgdragen dat de tram ongehinderd door kan rijden. Bij een vrije baan ligt de trambaan in het midden of aan de zijkant van de weg en heeft de tram bij kruispunten te maken met ander verkeer. (zie figuur 4.1)



Figuur 4.1 Tram op vrije baan

2 Beweegbare bruggen zorgen ook voor verstoringen in de infrastructuur en dus in de dienstuitvoering. Door het open en dicht gaan van een brug zal de dienstuitvoering van het openbaar vervoer een kleine tijd verstoord zijn. De seizoenen spelen hierin een belangrijke rol. In de winter vindt er weinig scheepvaart plaats, bijna uitsluitend beroepsvaart, maar in de zomer is er naast de beroepsvaart ook veel recreatievaart aanwezig op het water. Hierdoor variëren de openingstijden en de duur van een brugopening per seizoen. Ook de verdeling over een dag is van belang. Overdag zal er meer gevaren worden dan 's nachts. Afhankelijk van de OV-diensten die gebruik maken van een beweegbare brug, zal een bus- of een tramsysteem hinder ondervinden.

3 Ongevallen gebeuren iedere dag. Daar is het openbaar vervoer lang niet altijd direct bij betrokken, maar het openbaar vervoer kan wel hinder ondervinden van ongevallen. Door een ongeval kan namelijk het infrastructuurnetwerk tijdelijk geblokkeerd zijn op een bepaalde plaats. Als die plaats gebruikt wordt door een OV-lijn, ondervindt het dienstennet van het openbaar vervoer ook hinder.

Als het ongeval niet ernstig is (alleen blikshade), worden voertuigen die betrokken zijn bij een ongeval vrij snel weggesleept of aan de kant gezet. Is er letselschade ontstaan bij een ongeval, dan is de overlast van een ongeval een stuk groter en wordt vaak de desbetreffende infrastructuur tijdelijk afgesloten zodat hulpdiensten snel ter plaatse kunnen zijn.

Bij ongevallen is een onderscheid te maken naar ongevallen die plaatsvinden op een *kruispunt* of ongevallen die plaatsvinden op *wegvakken*. Op een kruispunt is de uitwijkruimte namelijk groter dan op een wegvak. Het is noodzakelijkerwijs dus niet zo dat alle verplaatsingsrichtingen direct last hebben van het ongeval. Op een wegvak raakt de verkeersstroom eerder geblokkeerd dan op een kruispunt. Een ongeval op een wegvak heeft nadeliger gevolgen voor de dienstuitvoering van openbaar vervoer dan een ongeval op een kruispunt.

Een bussysteem ondervindt hinder van ongevallen op kruispunten *en* wegvakken.

Een tramsysteem heeft op een groot deel van een stedelijk OV-net een vrije baan. Als de tram van een vrije baan gebruik maakt, heeft de tram alleen hinder van ongelukken op *kruispunten*. Plaatsen waar de tram tussen het overige verkeer inrijdt, heeft de tram wel hinder van alle ongevallen.

4 Bij weersinvloeden kan men denken aan allerlei zaken die met weer te maken. Van afgewaaid takken die op weg of rails vallen als gevolg van harde wind tot een sneeuwbuï die

het onmogelijk maakt om op een veilige manier van de weg gebruik te maken. In dit onderzoek gaat het om weersinvloeden die ervoor zorgen dat de infrastructuur slecht of totaal niet meer toegankelijk is. Een normale regenbui valt hier dus niet onder. Het karakter van het weer moet iets extreems in zich hebben.

Bij de invloed van het weer speelt de vervoerwijze een rol. Een tram maakt gebruik van railtechniek en is bijvoorbeeld minder vatbaar voor gladheid dan een bus die over de weg rijdt.

Weersinvloeden zijn afhankelijk van het jaargetijde. Elk jaargetijde heeft zijn eigen karakteristieken.

Er kan onderscheid gemaakt worden in de volgende weersinvloeden:

- 1 Wind
- 2 Regen
- 3 IJzel
- 4 Sneeuw
- 5 Onweer

1 Wind, De effecten van een storm op de infrastructuur zijn dat er takken op de weg of rails komen te liggen, dat de bovenleiding kapot raakt of dat er complete bomen omwaaien waardoor de infrastructuur niet te gebruiken is. Duidelijk is dat de dienstuitvoering van het openbaar vervoer ernstig verstoord kan raken door een storm. Extreme windsnelheden en stormen kunnen in principe in ieder deel van het jaar optreden.

2 Regen, Infrastructuur is vrij goed bestand tegen regenval. De afwatering is in Nederland goed; het komt zelden voor dat een weg onder water komt te staan. Het is wel denkbaar dat een tramtunnel door veelvuldige regenval of door lekkage onder water loopt.

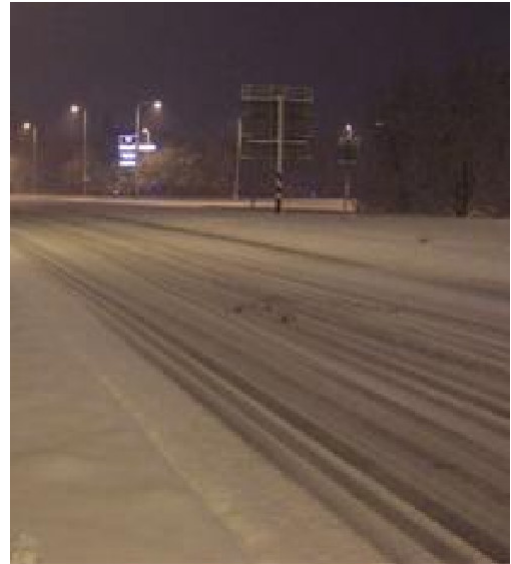
3 IJzel, Door ijzel worden de wegen glad. Railinfrastructuur heeft hier minder last van. Treinen en trams kunnen iets minder hard optrekken en remmen dan normaal. Wel kan het zo zijn dat door ijzel de bovenleiding beschadigd raakt of dat de geleidingsdraden breken.

IJzel is 's ochtends vroeg gevaarlijker dan overdag. Overdag wordt de weginfrastructuur veel gebruikt waardoor de temperatuur van het wegdek hoger is. Dan krijgt ijzel weinig kans. 's Ochtends vroeg echter bij het begin van de dienstuitvoering kan het wegdek zeer glad zijn. Dan kan het voorkomen dat men wacht met het starten van de dienstuitvoering totdat de wegen gepekeld zijn en er een positief reisadvies afgegeven is. (Kok, 2004)

Door de gladheid gebeuren er extra ongelukken waarvan de dienstuitvoering van een bus- of een tramsysteem hinder kan ondervinden.

4 Extreme sneeuwval, In Nederland sneeuwt het niet zo vaak. Dit ligt sterk aan het zeeklimaat dat in Nederland heerst. Hierdoor zijn de winters vaak zacht. Valt er een keer wel sneeuw, dan kan dit gevolgen hebben voor de infrastructuur. (zie figuur 4.2)

Wegen en spoorwegen kunnen ondergesneeuwd raken en het is mogelijk dat door sneeuw constructies bezwijken (bijvoorbeeld de bovenleiding) wat tot hinder in de dienstuitvoering leidt. Vaak is sneeuw niet zo schadelijk voor de infrastructuur omdat het bijna direct smelt, waardoor de invloed van sneeuw eigenlijk dezelfde is als die van een regenbui en die is bijna nihil. Sneeuwval is alleen kritiek voor de infrastructuur als er een goed pak sneeuw valt dat daadwerkelijk blijft liggen. Dan duurt het een tijdje voordat alle wegen goed gepekeld en weer toegankelijk zijn.



Figuur 4.2 Sneeuw op de weg

5 Onweer, Onweer is een zeer ongrijpbare weersinvloed omdat het namelijk niet afhankelijk is van tijd noch plaats. Het jaargetijde is ook niet van belang. Onweer hoeft niet schadelijk te zijn voor het openbaar vervoer. Het wordt pas schadelijk als de bliksem op een kritieke plaats inslaat. Kritieke plaatsen in een OV-systeem zijn bijvoorbeeld: een transformatorhuisje, een sein- of een wisselkast of de bovenleiding. Al deze kenmerken hebben betrekking op een tramsysteem en zijn niet van toepassing op een bussysteem. Onweer is niet direct schadelijk voor de gewone weginfrastructuur waar de bus van gebruik maakt.

5 Bij onderhoudswerkzaamheden aan de infrastructuur is het logisch dat het dienstennetwerk dat van die infrastructuur gebruik maakt, hinder ondervindt. De mate van hinder hangt af van de planning van het werk. Als het mogelijk is, vinden werkzaamheden die de dienstuitvoering van het openbaar vervoer hinderen bijvoorbeeld 's nachts plaats of er wordt lang van tevoren gepland dat een bepaalde schakel in het infrastructuurnetwerk een week lang niet te gebruiken is en dat de reizigers via een andere route moeten reizen of dat er een alternatieve route wordt gereden gedurende de tijd van de werkzaamheden.

4.3 Keuze en overzicht te modelleren verstoringen

In de vorige paragraaf zijn mogelijke factoren beschreven die tot verstoringen kunnen leiden. Er zal hier een keuze gemaakt worden in factoren die wel en niet meegenomen zijn in het onderzoek.

Hinder door overig verkeer is in de modellering niet meegenomen. Dit is gezien als incidentele onregelmatigheden in de dienstuitvoering waardoor de rijtijd van voertuigen wat varieert. En dus niet als een verstoring in de beschikbaarheid van infrastructuur.

Brugopening is alleen relevant als er een brug in het netwerk aanwezig is. In de casus, die in het volgende hoofdstuk aan de orde komt, is dit niet het geval. Deze verstoring komt ook te vervallen.

Over regen is eerder al vermeld dat dit niet direct voor problemen zorgt in Nederland vanwege de goede afwatering. Alleen in verlaagde gedeeltes in het infrastructuurnetwerk zoals bijvoorbeeld een tramtunnel zou regen voor verstoringen kunnen zorgen. Dat is echter niet van toepassing in dit onderzoek.

Van de overige verstoringen in het infrastructuurnetwerk die gemodelleerd worden, is in tabel 4.1 een overzicht gegeven van de belangrijkste kenmerken. Dan gaat het om de frequentie en duur van de verstoring, om de plaats van de verstoring en of de verstoringen seizoensafhankelijk zijn.

	Frequentie		Duur verstoring			Plaats verstoring		Seizoensinvloeden	
	vaak	bijna nooit	0-2 uur	0-2 dagen	0-2 weken	lokaal	netwerkbreed	wel	niet
Ongevallen									
Wind									
IJzel									
Sneeuw									
Onweer									
Onderhoud									

Tabel 4.1 Eigenschappen verstoringen

De te modelleren verstoringen zijn in te delen in een aantal groepen. Een logische indeling hiervoor als men kijkt naar tabel 4.1, is een indeling gebaseerd op tijdsduur van de verstoring. Hiermee is namelijk tegelijkertijd onderscheid gemaakt in de frequentie van optreden en in de plaats van de verstoring. Er ontstaan dan 3 categorieën verstoringen: Ongevallen, weersinvloeden en onderhoudswerkzaamheden. Het enige kenmerk dat minder goed naar voren komt in deze indeling zijn de seizoensinvloeden. De weersinvloeden zouden in 2 categorieën ingedeeld kunnen worden zodat ook dat aspect meegenomen wordt. Echter is hier niet voor gekozen in dit onderzoek.

Omdat de indeling van de verstoringen gebaseerd is op tijdsduur van de verstoringen, wordt in het verder verloop van het onderzoek gesproken over kleine verstoringen, weersinvloeden en grote verstoringen.

Kleine verstoringen behelzen dan de ongevallen.

Weersinvloeden zijn wind, ijzel, sneeuw en onweer.

Grote verstoringen zijn de onderhoudswerkzaamheden.

In navolgende tabel is het overzicht van de typen verstoringen te zien met hun kenmerken:

	Frequentie		Duur verstoring			Plaats verstoring		Seizoensinvloeden	
	vaak	bijna nooit	0-2 uur	0-2 dagen	0-2 weken	lokaal	netwerkbreed	wel	niet
Kleine verst.									
Weersinvl.									
Grote verst.									

Tabel 4.2 Overzicht eigenschappen verstoringen

4.4 Vergelijking bus-tramsysteem

Het onderzoek spitst zich toe zoals eerder al genoemd op een stedelijk openbaar vervoersysteem en er is zowel met een bus- als een tramsysteem gewerkt. In deze paragraaf is een vergelijking gemaakt tussen beide vervoerssystemen om te analyseren waar ze verschillen en waar beide systemen overeen komen. De verschillen en overeenkomsten staan gerangschikt naar relevantie met betrekking tot dit onderzoek:

Verschillen bus-tram: *1 Flexibiliteit binnen het infrastructuurnetwerk*, een bus is flexibeler qua dienstuitvoering dan een tram. Een bus kan zonder veel extra kosten een andere route rijden omdat het infrastructuurnetwerk waar hij over beschikt veel dichter is dan dat van de tram. Een tram is afhankelijk van de infrastructuur die speciaal voor hem is aangelegd. Daar zijn meestal maar een aantal vaste routes beschikbaar en daarbuiten zijn er weinig alternatieven. Dit is verreweg het belangrijkste verschil tussen een bus en een tram bij de netwerkontwerpvrage.

2 Verschil in investeringskosten en exploitatiekosten, weginfrastructuur is goedkoper dan railinfrastructuur. De exploitatiekosten voor een busdienst zijn lager dan voor een tramdienst.

3 Flexibiliteit binnen het baan- en straatprofiel, een bus is niet gebonden aan een vaste baan. Hij heeft de mogelijkheid om uit te wijken voor obstakels. Een tram heeft die mogelijkheid niet. Hij maakt gebruik van vaste railinfrastructuur en is daardoor gebonden aan een vaste route en is moeilijker in staat om obstakels te ontwijken.

4 Vrije baan en de kans op ongevallen, een bus rijdt tussen het verkeer in en heeft hierdoor meer hinder van het andere verkeer en dus ook een grotere kans op ongevallen dan een tram. Een tram heeft regelmatig een vrije baan en heeft hierdoor vooral op de kruispunten te maken met ander verkeer.

Overeenkomsten: *1 Dezelfde netwerkvorm*, zowel de bus als de tram hebben vaak een radiale netwerkstructuur in de stad. Alle lijnen komen samen bij het centrale station in de stad, waar dan overgestapt kan worden op een andere lijn. Meestal zijn er ook nog een aantal tangentiële lijnen die zorgen voor kortere verbindingen tussen de radiaallijnen. Deze overeenkomst is gebruikt in dit onderzoek door hetzelfde dienstennetwerk te veronderstellen voor beide vervoerwijzes.

2 Dienstregeling, beide vervoerwijzes rijden volgens een vaste dienstregeling. Deze dienstregeling raakt verstoord als er verstoringen optreden. Dan kan een bepaalde schakel in het netwerk niet gebruikt worden en zal de dienstuitvoering niet precies meer volgens het boekje kunnen lopen.

3 Operationele snelheid, een bus en een tram hebben in een stedelijk OV-systeem ongeveer dezelfde operationele snelheid van ongeveer 20 km/h.

Het belangrijkste van deze analyse zijn de verschillen tussen beide systemen. Gezien het verschil in flexibiliteit en in beschikbare infrastructuur tussen beide vervoertechnieken is het interessant om te zien of deze verschillen terugkomen in de effecten als gevolg van de verstoringen in de beschikbaarheid van infrastructuur.

Hoofdstuk 5 Beschrijving model en modelkeuzes

5.1 Inleiding

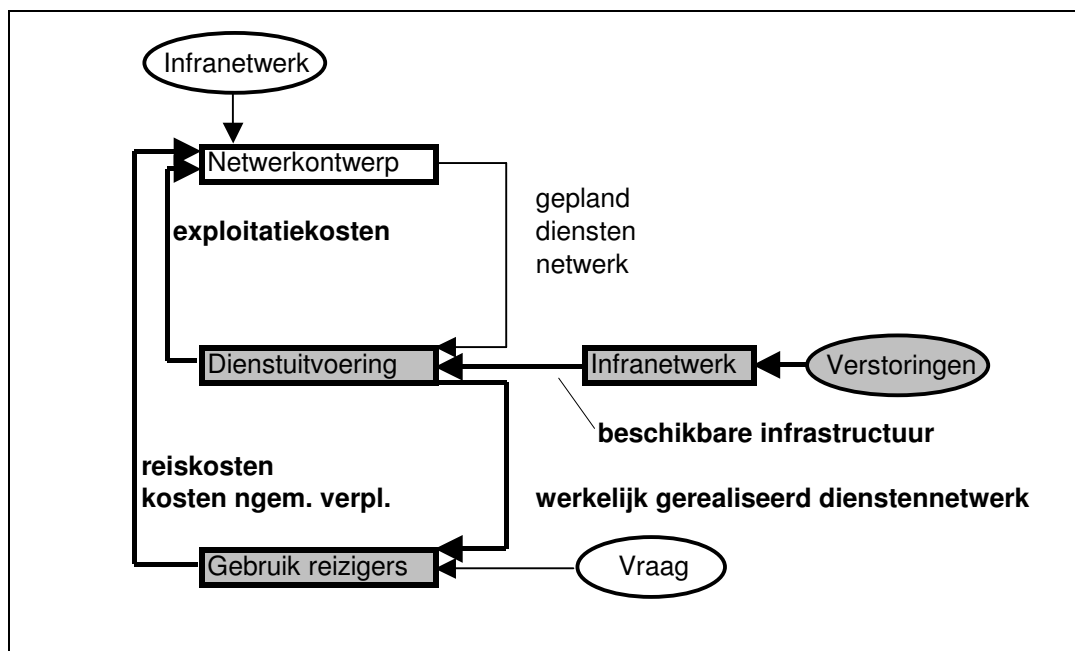
In dit hoofdstuk komt het model aan de orde dat een antwoord probeert te geven op de centrale vraag zoals die eerder in hoofdstuk 3 is geformuleerd. Om de effecten van onzekerheden in de verkeersdiensten te onderzoeken, zal de ontwerpstructuur voor een netwerk moeten veranderen. (par. 5.2) Er wordt een keuze gemaakt voor simulatie van de verstoringen door de tijd heen (par. 5.3) en om dit vorm te kunnen geven, is een model gebouwd. (par. 5.4) Met dit model kunnen de effecten voor de gebruiker en voor de kosten berekend worden. Het model is toegepast op een eenvoudig stedelijk OV-netwerk. In paragraaf 5.5 volgt een uitgebreide beschrijving van het model met alle modelkeuzes en aannames die gemaakt zijn. Hierin staat onder andere de impact van de verschillende verstoringstypen op de infrastructuur en op de vervoerdiensten, de gekozen toedelingmethode, de gebruikte kortstepad-methode en de formules voor berekening van de verschillende kostencomponenten.

5.2 Ontwerpopzet voor doorrekening effecten

De hoofdvraag in dit onderzoek is hoe het netwerkontwerp van stedelijk openbaar vervoer dient te worden aangepast als gevolg van verstoringen in de beschikbaarheid van infrastructuur.

Hiervoor is het noodzakelijk dat we het *effect* van de *verstoringen* op de *kosten* en het *effect* voor de *reiziger* te weten komen bij een gegeven netwerkstructuur.

Door de verstoringen in de beschikbaarheid van infrastructuur ontstaat er een verschil tussen de geplande en de gerealiseerde dienstuitvoering. Dit maakt het noodzakelijk om in vergelijking met het 'bilevelprobleem' een extra niveau in de ontwerpopzet te onderscheiden. De gewijzigde ontwerpopzet is hieronder weergegeven (figuur 5.1). Er is een extra invoercomponent bijgekomen in de vorm van verstoringen die aangrijpen op het gekozen infrastructuurnetwerk. Hierdoor wijzigt de werkelijk gerealiseerde dienstuitvoering.



Figuur 5.1 Ontwerpopzet onderzoek

Een ovaal blok is een invoercomponent en een rechthoekig blok is een proces. Alle termen bij de pijlen zijn uitvoercomponenten van de processen. De grijs gekleurde blokken en de vetgedrukte uitvoercomponenten zijn stochastisch. Het infranetwerk als invoercomponent bij het netwerkontwerp hoeft niet altijd invoer te zijn. Als er een compleet nieuw dienstennetwerk ontworpen moet worden (bijvoorbeeld het ontwerp van een tramlijn in een nieuwe woonwijk), dan is vaak het infrastructuurnetwerk nog niet aanwezig en is het infranet een ontwerpvariabele.

Het vraagpatroon is constant aangenomen, dus het invoerblok voor de vraag is wit. Het tweede invoerblok, dat van de verstoringen is stochastisch. In het vorige hoofdstuk is naar voren gekomen wat die verstoringen kunnen zijn. Deze verstoringen zorgen voor een wisselend beschikbaar infrastructuurnetwerk over de tijd. Bij het netwerkontwerp is van het gehele infranetwerk uitgegaan, dus er zal een correctie moeten plaatsvinden in het dienstennetwerk. Deze aanpassing gebeurt in het blok 'dienstuitvoering'. Hieruit volgt dan het werkelijk gerealiseerde dienstenaanbod voor de reizigers.

Uit de figuur blijkt dat alle kostencomponenten stochastisch zijn door de verstoringen in het infrastructuurnetwerk.

Elk van de drie aangegeven hoofdniveaus heeft zijn eigen doelfunctie, ontwerpvariabelen en randvoorwaarden. Een aantal mogelijke doelfuncties, ontwerpvariabelen en randvoorwaarden zijn beschreven in tabel 5.1

	Doelfunctie	Ontwerpvariabelen	Randvoorwaarden
Netwerkontwerp	max. welvaart	schakels, lijnen	budget, hoger orde netwerk
Dienstuitvoering	max. aanbod diensten	route voertuigen, voertuiginzet	aantal voertuigen
Gebruik reizigers	min. individuele reiskosten	route reizigers	capaciteit voertuigen

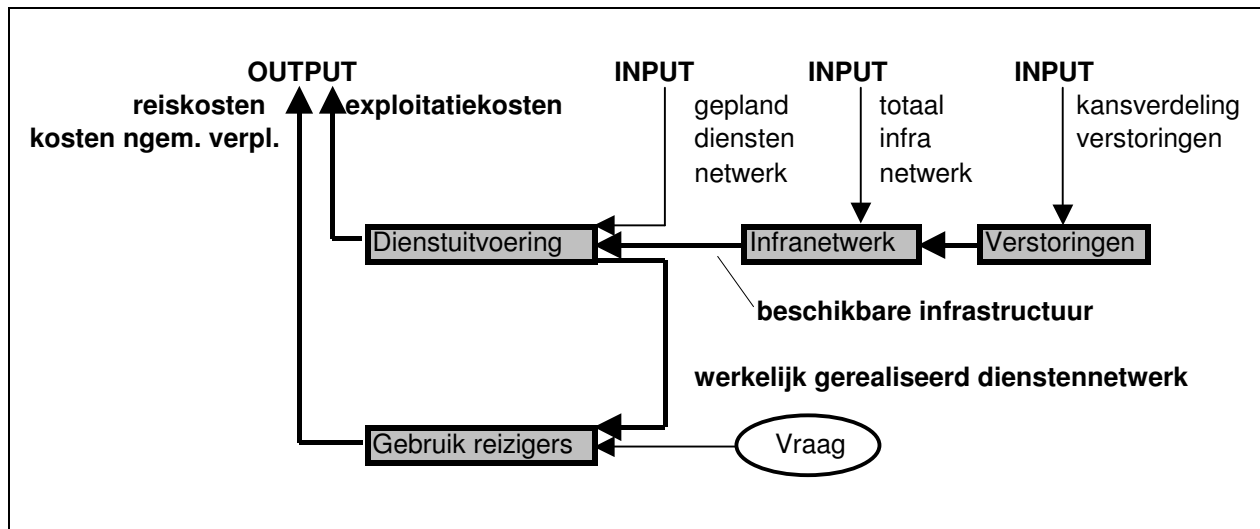
Tabel 5.1 Doelfunctie, ontwerpvariabelen, randvoorwaarden per hoofdniveau ontwerpstructuur

De doelfuncties, ontwerpvariabelen en randvoorwaarden van het *ontwerpniveau* en *gebruikersniveau* zijn in hoofdstuk 2 al aan de orde gekomen. Het niveau van de dienstuitvoering is toegevoegd vanwege de verstoringen in de beschikbaarheid van infrastructuur. Op dat niveau kan bijvoorbeeld het aanbod van diensten gemaximaliseerd worden. Dat houdt in dat bij een verstoring zoveel mogelijk getracht wordt om het dienstenaanbod intact te houden en te zorgen voor een vervoerdienst. Dit kan bijvoorbeeld door voertuigen andere routes te laten rijden of door extra voertuiginzet om een bepaalde frequentie te handhaven. Randvoorwaarde hierbij kan zijn het maximaal beschikbaar aantal voertuigen.

Afbakening analyse

Bij de onderzoeksopzet (par. 3.6) is eerder al kort genoemd dat de effecten van de verstoringen worden bestudeerd door vergelijking van een aantal netwerkvarianten die verschillend zijn van structuur. Het netwerkontwerpniveau is dus vervangen door een aantal verschillende dienstennetwerkvarianten. De centrale vraag geeft ook al aan dat de focus ligt bij de terugkoppeling naar het netwerkontwerpniveau en niet zozeer bij het netwerkontwerpniveau zelf.

In figuur 5.2 is de afbakening van de analyse te zien waarmee de effecten voor het netwerkontwerpniveau berekend kunnen worden. Er zijn 4 invoercomponenten (geplande dienstennetwerk, totale infranetwerk, kansverdeling van de verstoringen en vraagpatroon) en een drietal uitvoercomponenten (exploitatiekosten, reiskosten en kosten voor niet gemaakte verplaatsingen) te onderscheiden.



Figuur 5.2 Afbakening analyse

5.3 Keuze berekeningsmethode

De doorwerking van de verstoringen en de berekening van de effecten daarvan kan op twee manieren gebeuren:

- 1 Rekenen met een faalboom
- 2 Rekenen met simulatie

ad 1 Iedere mogelijke verstoring krijgt een bepaalde kans van optreden. Die kans wordt uit de kansverdelingen van de afzonderlijke verstoringen bepaald. Uit de kans van optreden van een verstoring kan de faalkans van een schakel berekend worden. De bijbehorende kosten voor een schakel volgen dan uit de berekening: $\text{Kosten} = \text{Kans} * \text{effect van uitval van een schakel}$. Zo kan voor één type verstoring voor alle schakels de kosten worden berekend. Afhankelijk van de keuze die men maakt, kunnen ook combinaties van verstoringen doorgerekend worden. Dit is een berekeningsmethode die louter naar de plaats van de verstoring kijkt. (tijdsdimensie is alleen van belang voor de grootte van de faalkans)

ad 2 Bij simuleren wordt het effect van de verstoringen door de tijd heen berekend. Alle verstoringen die optreden worden afzonderlijk doorgerekend. Deze methode rekent zowel naar plaats als naar tijd. Binnen een simulatiemethode zijn weer een aantal keuzes mogelijk waar hier niet verder op wordt ingegaan. Die keuzes volgen in paragraaf 5.5.

De eerste methode is meestal (afhankelijk van het aantal combinaties van verstoringen dat in ogenschouw wordt genomen) een snellere methode dan de simulatiemethode. Nadeel is dat deze methode ver van de werkelijkheid afstaat. De faalboom-methode is vooral geschikt als men snel en eenvoudig een eerste inzicht wil verkrijgen in het optreden van externe invloeden.

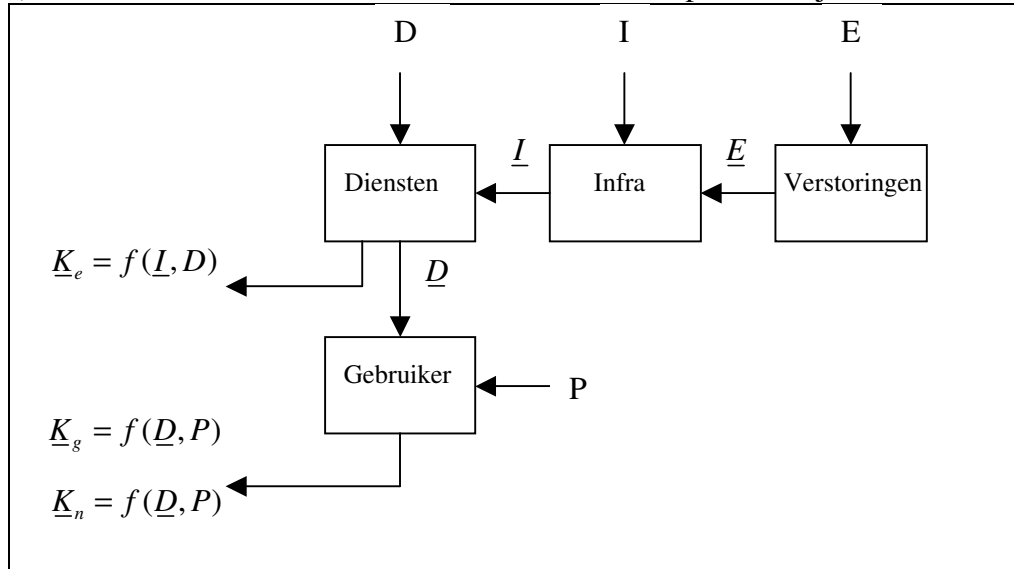
De simulatiemethode representeert de werkelijkheid beter dan de analytische methode doordat met verstoringen over plaats en tijd gerekend wordt. Per verstoring is helder wat er precies gebeurt in het dienstennetwerk. Het is ook mogelijk dat er gedurende een bepaalde tijd twee of meer verstoringen het infranetwerk verstoren. Deze mogelijkheid is tijdens de simulatie open. Bij de faalboom methode moet dat hard vooraf gedefinieerd worden.

Er is gekozen om in dit onderzoek te rekenen met de simulatiemethode. Belangrijkste redenen om voor deze methode te kiezen, zijn de betere weergave van de werkelijkheid, de open mogelijkheid dat er 2 of meer verstoringen tegelijk optreden en het betere inzicht dat men heeft op de impact van een verstoring. Nadeel is wel dat de methode iets langzamer is en dat met de analytische methode duidelijker keuzes gemaakt kunnen worden welke verstoringen wanneer optreden en of er tegelijkertijd meerdere verstoringen kunnen optreden. Men weet beter wat er precies gebeurt in het netwerk.

Om de effecten van verstoringen voor het gerealiseerde diensten- en verplaatsingenpatroon door middel van simulatie te kunnen onderzoeken, is een model gemaakt. Dat model vertoont een sterke analogie met de afbakening van de uitgevoerde analyse (figuur 5.2).

5.4 Ontwikkelde model

Het ontwikkelde model berekent gegeven een bepaald diensten- en infranetwerk en een vast vraagpatroon de effecten voor de kosten van de exploitant en voor de gebruiker als gevolg van verstoringen in de beschikbaarheid van infrastructuur. De structuur van dit model is als volgt: (alleen de relevante effecten voor het netwerkontwerpniveau zijn vermeld als uitvoer)



Figuur 5.3 Ontwikkelde model voor berekening effecten als gevolg van verstoringen in het infranet

Input:

E = kansverdeling verstoringen
 I = gegeven infranetwerk
 D = gepland dienstennetwerk
 P = vervoervraag

Stochastische modelvariabelen:

$\underline{E}$ = verstoringen door de tijd
 $\underline{I}$ = gerealiseerde infranetwerk
 $\underline{D}$ = gerealiseerde dienstennetwerk

Stochastische output:

$\underline{K}_e$ = exploitatiekosten
 $\underline{K}_g$ = gebruikskosten (reiskosten)
 $\underline{K}_n$ = kosten niet gemaakte verplaatsingen

Verwerkingsblokken:

Verstoringen: Berekening werkelijke optreden van verstoringen uit de kansverdeling van de verstoringen. Wanneer en hoe lang duren de verstoringen?

Infra: Berekening van het effect van verstoringen op de beschikbare infrastructuur. Welke infra valt uit en welke infra is beschikbaar?

Diensten: Berekening van het effect van het gerealiseerde infranetwerk op het dienstennetwerk gegeven een gepland dienstennetwerk. Welke diensten vallen uit, welke diensten rijden een andere route, etc. en wat zijn de bijbehorende exploitatiekosten?

Gebruiker: Berekening van het effect van het gerealiseerde dienstennetwerk voor de gebruiker gegeven een vaste vervoervraag. Hoe veranderen de routes van de reizigers over het dienstennetwerk, welke verplaatsingen kunnen niet gemaakt worden en wat zijn de bijbehorende kosten voor de gebruiker?

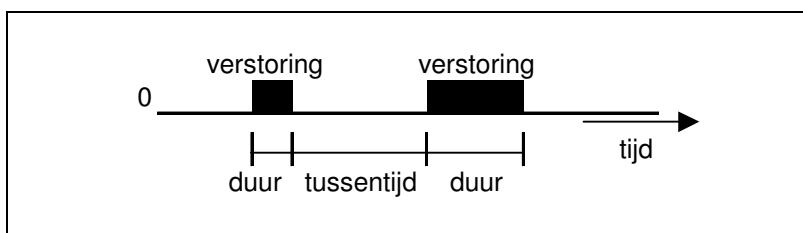
5.5 Beschrijving componenten van het model

In deze paragraaf komen alle componenten van het model aan de orde met de respectievelijke *modelkeuzes* en *aannames*. Eerst wordt gekeken naar de 4 invoercomponenten in het model (5.5.1), vervolgens naar de 4 verwerkingsblokken waar de berekeningen plaatsvinden (5.5.2) en tenslotte naar de 3 uitvoercomponenten van het model (5.5.3). In het volgende hoofdstuk worden de *invoerkeuzes* van het model behandeld.

5.5.1 Invoer

Kansverdeling verstoringen

Dit invoerdeel bestaat uit kansverdelingen per type verstoring waarmee de tussentijden en de tijdsduur van de verstoringen berekend kunnen worden (figuur 5.4). De plaats van de verstoringen wordt pas berekend bij het verwerkingsblok 'infra'.

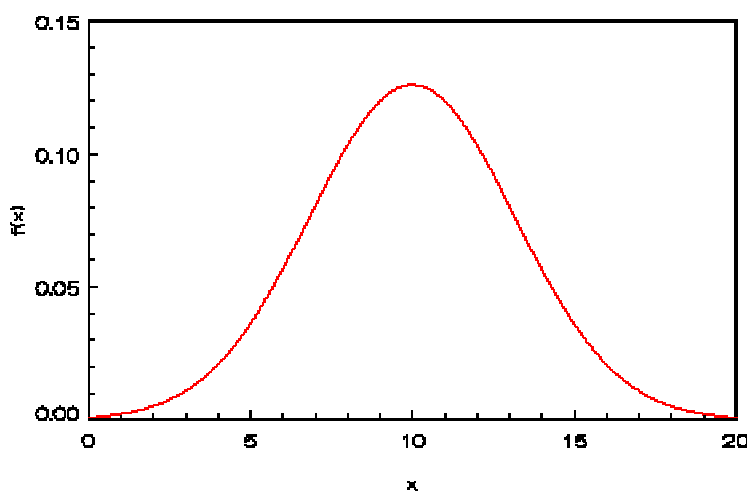


Figuur 5.4 Tussentijd en duur van verstoringen

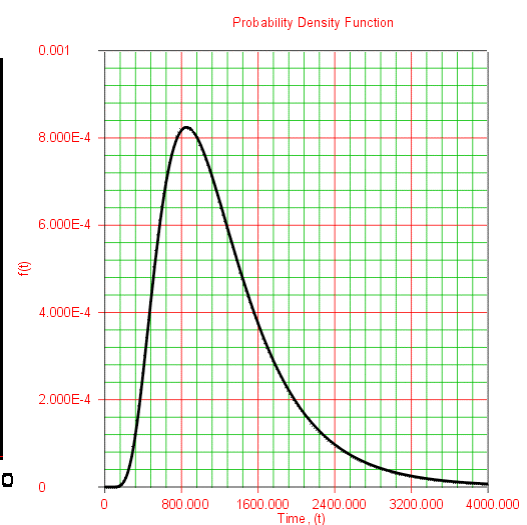
Een aantal mogelijke kansverdelingen voor tussentijd en duur van de verstoringen zijn:

- ♣ De normale verdeling (fig. 5.5)
- ♣ De lognormale verdeling (fig. 5.6)
- ♣ De negatief exponentiële verdeling (fig. 5.7)
- ♣ De Weibull-verdeling (fig. 5.8)

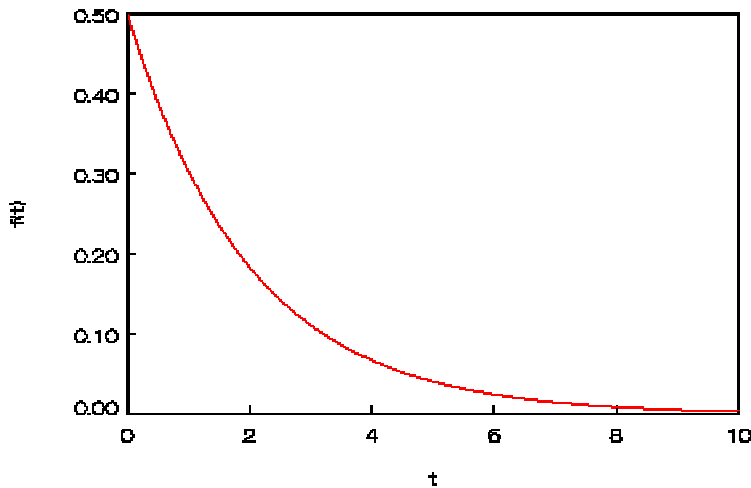
Al deze figuren geven de kans-dichtheidsfunctie weer van de desbetreffende verdeling met *willekeurige* parameters. Het gaat hier om een indruk te krijgen van de vorm van een verdeling.



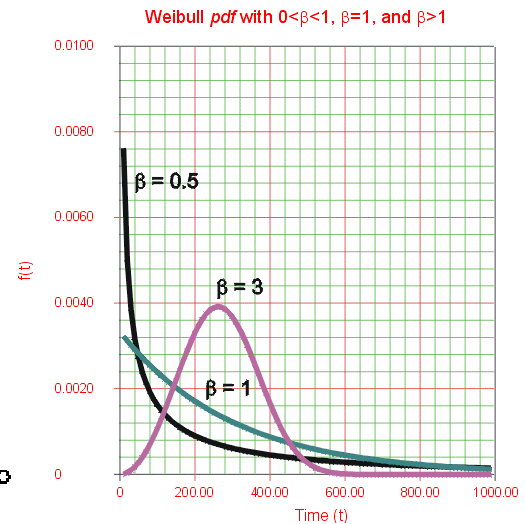
Figuur 5.5 Normale verdeling



Figuur 5.6 Lognormale verdeling



Figuur 5.7 Negatief exponentiële verdeling



Figuur 5.8 Weibullverdeling

Per type verstoring is een verdeling gekozen met zijn eigen parameters die beschrijft hoe vaak die verstoring gemiddeld optreedt en wat de spreiding is van de verdeling. Dit geldt evenzo voor de duur van een verstoring. Welke keuzes gemaakt zijn, volgen in hoofdstuk 6 onder de invoerkeuzes van het model.

Een belangrijke vraag bij de verschillende verstoringen is of ze elkaar onderling beïnvloeden of niet. Als verstoringen elkaar beïnvloeden, zijn de kansen op verstoringen *afhankelijk*. Is dat niet het geval, dan zijn de afzonderlijke kansen *onafhankelijk*.

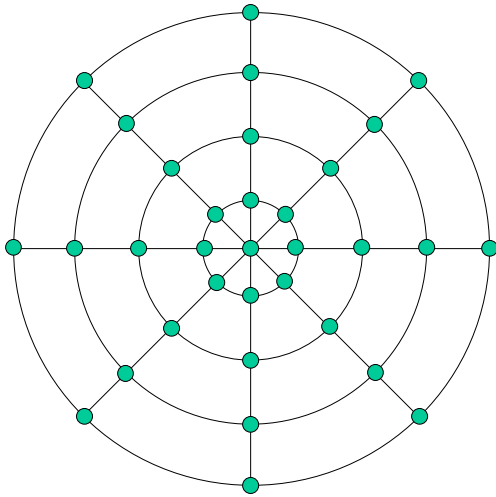
Er is aangenomen dat de kansverdelingen van de verschillende verstoringen *onafhankelijk* van elkaar zijn. In werkelijkheid is dit niet altijd zo (door een storm bijvoorbeeld kunnen extra ongevallen voorkomen en zijn er bijvoorbeeld bomen die omwaaien). In het model zijn deze effecten dan zoveel mogelijk ondergebracht bij de categorie weersinvloeden zodat de kansverdelingen naar tijd van de verschillende verstoringen onafhankelijk zijn.

Binnen één type verstoring is aangenomen dat de kans op een volgende verstoring van dat type niet afhankelijk is van de actuele verstoring. Dus een ongeval heeft geen invloed op een volgend ongeval.

Gegeven infranetwerk

De tweede invoercomponent in het model is het beschikbare infrastructuurnetwerk. Om welk type infrastructuur het gaat, hangt af van de vervoertechniek. In dit onderzoek beschouwen we stedelijke rail- en wegtechniek, dus de infrastructuurnetwerken voor dit onderzoek zijn een tramnetwerk en het wegennetwerk van een stad. Het infrastructuurnetwerk is voor de bus en de tram dus *niet* hetzelfde. De bus heeft namelijk een veel groter infranetwerk tot zijn beschikking dan een tram.

Het infrastructuurnetwerk dat voor de bus als casus geldt bij de analyse ziet er als volgt uit (figuur 5.9):

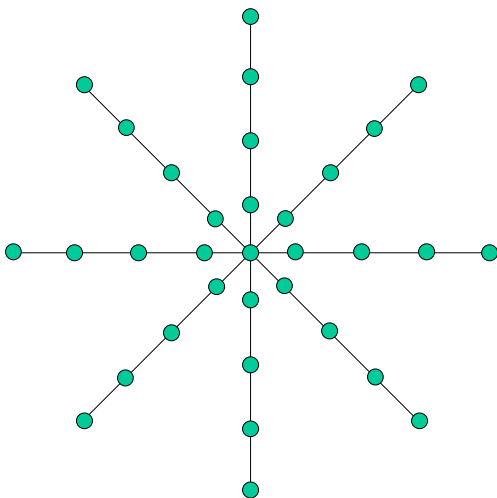


Figuur 5.9 Infrastructuurnetwerk bus

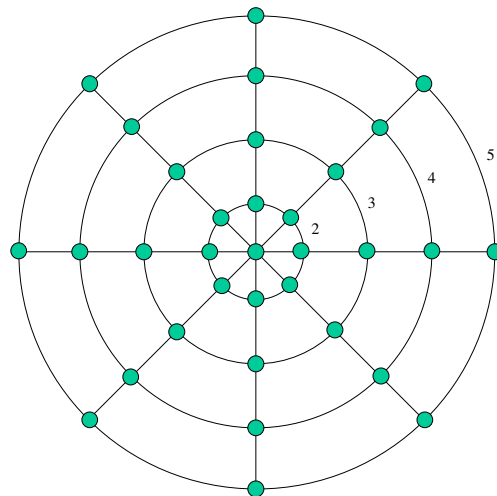
Bij de *bus* gaan we ervan uit dat deze bijna alle aanwezige weginfrastructuur kan gebruiken. In figuur 5.9 zijn de lijnen de hoofdverbindingswegen in de stad en de knopen zijn de knooppunten tussen de hoofdverbindingswegen. De totale lengte van dat hoofdwegennet is 260 km. Daarnaast is er een onderliggend wegnnet in de stad dat toegankelijk is voor een bus en dat hij kan gebruiken in geval van calamiteiten. In dit onderliggende infranetwerk zijn vele toegangspunten aanwezig die verder niet relevant zijn in het onderzoek. Buffer- en stallingsvoorzieningen spelen ook geen rol in het onderzoek.

Het infrastructuurnetwerk is voor de bus bij alle dienstennetwerkvarianten hetzelfde:

Bij een *tramsysteem* hangt het gekozen infranetwerk sterk samen met de aangeboden vervoerdiensten omdat de investeringskosten voor traminfra hoog zijn en het in de meeste gevallen niet rendabel is om infrastructuur aan te leggen die alleen in geval van calamiteiten gebruikt wordt. Dus is bij een tramsysteem het infrastructuurnetwerk gelijk aangenomen aan het dienstennetwerk. In de casus ligt het railinfranetwerk langs de hoofdverbindingswegen in de stad. Vanwege de 5 varianten die gemaakt zijn voor het dienstennetwerk, zijn er dus ook 5 varianten voor het infrastructuurnetwerk bij de tram. De eerste variant is een netwerk zonder ringinfrastructuur met alleen een centrumknoop en radialen. (zie figuur 5.10)



Figuur 5.10 Infrastructuurnetwerk tram variant 1



Figuur 5.11 Infranetwerk tram variant 2,3,4 en 5

Variant 2 is een variant met een ring dicht bij het centrum op een afstand van $1/7$ van de lengte van de radiaallijnen. Variant 3 is de variant met een ring op een afstand van $3/7$ van de lengte van de radiaallijnen etc. (zie figuur 5.11) Bij iedere variant 2-5 is dus iedere keer één ring aanwezig. In tabel 5.2 is per variant de lengte van het gebruikte infranet weergegeven.

Variant	Lengte infranet (km)
1	93
2	103
3	123
4	147
5	167

Tabel 5.2 Lengte infranet per variant

Toegangspunten en stallingsvoorzieningen zijn voor het tramnetwerk niet relevant in dit onderzoek. Voor het bepalen van de effecten van verstoringen speelt bijvoorbeeld de plaats van de tramremise namelijk geen rol.

Geplande dienstennetwerk

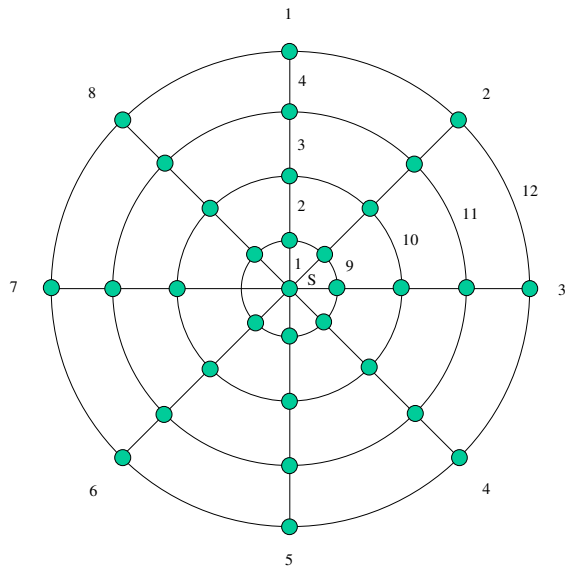
Het geplande dienstennetwerk is een derde invoercomponent van het model. Het heet gepland omdat in dit onderzoek het dienstennetwerk onderhevig is aan verstoringen en er dus een onderscheid is tussen het geplande en het gerealiseerde dienstennetwerk.

Dienstennetwerken zijn te onderscheiden in verschillende *netwerkstructuren*. In hoofdstuk 2 (par. 2.3) zijn een aantal netwerkstructuren op een rij gezet.

Een gebruikelijke netwerkstructuur bij een stedelijk OV-dienstennetwerk en tevens de gekozen structuur voor de casus is de ring-radiale structuur. Bij deze structuur is er één grote centrale knoop waar de meeste vervoerdiensten bij elkaar komen. Tevens dient deze knoop meestal als overstappunt naar hogere orde netwerken (de centrale knoop is vaak het centraal station in een stad). Naast de radiaallijnen zijn er in de ring-radiale structuur één of meerdere tangentiële lijnen aanwezig zodat de reiziger niet persé via de centrale knoop hoeft te reizen en zodoende een kortere reistijd heeft voor verplaatsingen tussen knopen op verschillende radialen.

Het gekozen dienstennetwerk voor bus en tram is exact hetzelfde. Hierin worden 5 varianten onderscheiden. Deze zijn weergegeven in figuur 5.12 en tabel 5.3. Iedere variant heeft naast een nummer een naam gekregen die de ringlijn beschrijft.

Het netwerk is opgebouwd uit 8 radiaallijnen, genummerd van 1-8, die samen komen op één groot centraal station S. Eén lijn is onderverdeeld in 4 schakels. (nummer 1-4 bij lijn 1) Per variant 2-5 is één van de tangentiële lijnen toegevoegd aan het dienstennetwerk met de radiaallijnen.

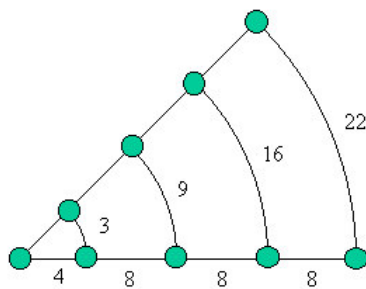


Figuur 5.12 Gekozen dienstennetwerk

Variant	Ringlijn	Dienstennetwerk
1	Geen ring	Alleen radiaallijnen
2	Centrumring	Radiaallijnen + lijn 9
3	Kleine ring	Radiaallijnen + lijn 10
4	Grote ring	Radiaallijnen + lijn 11
5	Buitenring	Radiaallijnen + lijn 12

Tabel 5.3 Varianten dienstennetwerk

Afhankelijk van de positie van de ringlijn veranderen de rijtijden tussen twee knopen op de ringlijn. Als de ringlijn dicht bij het centrum ligt, zijn de rijtijden klein, ligt de ringlijn aan de buitenkant van de stad, dan zijn er lange rijtijden tussen twee knopen. In figuur 5.13 zijn de rijtijden van de ringlijn weergegeven. Hier staan tevens de rijtijden over een radiaallijn in.



Figuur 5.13 Rijtijden per ringlijn

De frequentie van alle lijnen in het dienstennetwerk (radiaal- en ringlijnen), is gekozen op 6 voertuigen/uur. Dus om de 10 minuten rijdt er een bus of een tram. Er wordt geen differentiatie gemaakt in frequentie over de dag heen. In het onderzoek is is namelijk geen variatie in het aanbod van vervoersdiensten anders dan door verstoringen in het infranetwerk. Met de frequentie en de rijtijd is de voertuiginzet voor iedere variant te berekenen. Die is namelijk niet hetzelfde doordat de totale rijtijd van voertuigen over de ringlijn groter wordt naarmate die verder van het centrum komt te liggen. En als dezelfde frequentie gegarandeerd wordt, vereist dat een grotere voertuiginzet.

Een voorbeeldberekening van de voertuiginzet voor een radiaallijn: De rijtijd over een radiaallijn is $4 + 8 + 8 + 8 = 28$ minuten (zie figuur 5.13). Vervolgens heeft de bus of tram een buffertijd van 12 minuten, omdat 2 minuten te kort is. (grens van acceptabele buffertijd is aangenomen op 5 minuten, zodat enige vertraging en onregelmatigheid in de dienstuitvoering opgevangen kan worden en geen doorwerking heeft op de volgende rit) Dus in $2 * 40 = 80$ minuten is de vervoerdienst weer terug bij het beginpunt. Om een frequentie van 6 voertuigen/uur te garanderen is een voertuiginzet van $80 \text{ min.} / 10 \text{ min.} = 8$ voertuigen per radiaallijn vereist. In de navolgende tabel (tabel 5.4) is de voertuiginzet per netwerkvariant

weergegeven. Hierin valt tevens het totaal aantal voertuigkilometers per jaar af te lezen dat uit de voertuiginzet en aantal afgelegde kilometers/voertuig berekend is.

Variant	Voertuiginzet	Voertuigkm (mln)
1	64	7,3
2	70	8,0
3	80	9,7
4	92	11,6
5	102	13,3

Tabel 5.4 Voertuiginzet en voertuigkilometers per netwerkvariant

Een overzicht van het infrastructuur- en dienstennetwerk per variant voor bus en tram is in onderstaande tabel (tabel 5.5) weergegeven. (voor alle varianten geldt dat er vervoerdiensten worden aangeboden op de 8 radialen, de ontwerp vraag heeft alleen betrekking op de positionering van de ringlijn)

Varianten	Infranet bus	Dienstennet bus	Infranet tram	Dienstennet tram
1	Alles	Geen ringlijn	Geen ring	Geen ringlijn
2	Alles	Centrumringlijn	Centrumring	Centrumringlijn
3	Alles	Kleine ringlijn	Kleine ring	Kleine ringlijn
4	Alles	Grote ringlijn	Grote ring	Grote ringlijn
5	Alles	Buitenringlijn	Buitenring	Buitenringlijn

Tabel 5.5 Varianten diensten- en infranetwerk

Vervoervraag

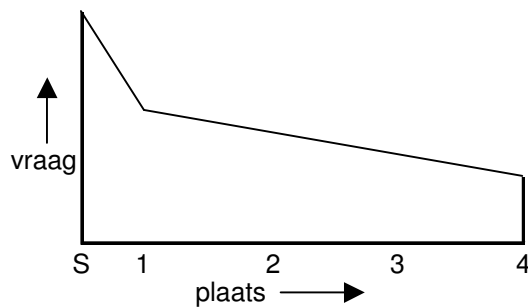
Een laatste invoercomponent van het model is de vervoervraag. De vervoervraag is verdeeld over *tijd en plaats*.

De vraag fluctueert over een dag (ochtend- en avondspits, piek- en daluren), over een week (werkdagen en weekend), over een maand (evt vakantieweken), over de seizoenen (zomer veel vervoervraag naar het strand) en over een jaar.

Variatie in de vraag en het verplaatsingspatroon valt echter buiten de scope van dit onderzoek. (zie hoofdstuk 3) De vervoervraag is constant over de tijd heen, dus zowel over dag, week, maand, seizoen en een jaar. Het zou wel mogelijk zijn binnen het model om variatie in de vraag over de tijd heen aan te brengen.

Naar plaats varieert de vervoervraag evenzo. Er zijn plaatsen in het netwerk die veel vervoervraag genereren (winkelcentra, stations) en plaatsen met minder vraag. (rand van de stad, eindpunt van lijnen). In de casus is aangenomen dat de zwaartepunten van zones waar de vervoervraag aangrijpt, samenvallen met de toegangspunten in het dienstennetwerk. Er hoeft dus geen rekening gehouden te worden met voor- en natransport.

In het model is het aantal verplaatsingen naar de centrumknoop (Centraal Station bijvoorbeeld) groter aangenomen dan naar de overige knopen en over een lijn heen loopt de vervoervraag langzaam terug. (zie figuur 5.14)



Figuur 5.14 Verdeling vraag over een lijn heen

In totaal zijn gemiddeld 14 % van alle verplaatsingen rechtstreeks naar het station en eveneens 14 % van de verplaatsingen rechtstreeks vanaf het station. Dit is exclusief de verplaatsingen die het station als overstapknoop binnen hetzelfde dienstennetwerk gebruiken. Voor verplaatsingen tussen knopen die niet op dezelfde lijn liggen, zijn random getallen getrokken en vermenigvuldigd met een bepaalde vervoeromvang. Deze vervoeromvang hangt af van het patroon geschetst in figuur 5.14. Dus HB-relaties in het centrum zijn zwaarder dan daarbuiten.

Verder is de attractiviteit en productiviteit van iedere lijn in het dienstennetwerk niet hetzelfde. Hier is differentiatie in aangebracht.

Op deze wijze hebben alle HB-relaties een aantal verplaatsingen toegewezen gekregen. In totaal zijn er 23,6 miljoen verplaatsingen per jaar binnen het dienstennetwerk.

Het type verplaatsingen (woon-werk, recreatie etc.) is een aspect dat samenhangt met de vervoervraag en de vervoerdiensten. Ieder type verplaatsing stelt zijn eigen eisen ten aanzien van comfort en verplaatsingssnelheid. In dit onderzoek is onderscheid naar type verplaatsing buiten beschouwing gelaten.

5.5.2 Verwerkingsblokken

In hoofdstuk 4 zijn mogelijke factoren genoemd die kunnen leiden tot verstoringen en zijn deze vertaald naar concrete verstoringen. Om deze verstoringen te kunnen modelleren, zal de impact van een verstoring op het beschreven infra- en dienstennetwerk duidelijk moeten zijn. De impact van de verstoringen (duur, frequentie en omvang) is gebaseerd op praktijkervaringen van vervoermaatschappij HTM in Den Haag. Zij exploiteren en beheren het stedelijk OV (bus en tram) in de stad.

De impact van de verstoringen is in 3 verwerkingsblokken verweven. In het blok 'verstoringen' gaat het om de frequentie, tijdsduur en seizoensafhankelijkheid van de verstoringen. In het blok 'infra' komt de koppeling van die verstoringen naar een plaats in het infrastructuurnetwerk aan de orde. Dus treft de verstoring één schakel in het netwerk of is de verstoring netwerkbreed en wat is de positionering van die schakels in het netwerk? Tenslotte in het blok 'diensten' wordt de link gelegd tussen de verstoring op het infranet naar de verstoring op het dienstennetwerk en wat voor aanpassingen er eventueel kunnen plaatsvinden in het dienstennetwerk.

De vier verwerkingsblokken in het model zullen nu achtereenvolgens behandeld worden.

Blok 1 Verstoringen

Het eerste blok is de berekening van het werkelijke optreden van verstoringen uit de kansverdelingen van de verstoringen. Die kansverdelingen zijn in de vorige paragraaf aan de orde gekomen. Door middel van simulatie worden de effecten van de verstoringen in het model berekend. Binnen de simulatiemethode zijn een aantal keuzemogelijkheden.

Ten eerste kan gesimuleerd worden met een discrete of een continue tijdas. In het eerste geval wordt per vaste tijdseenheid berekend of er een verstoring optreedt. Bij simulatie met een continue tijdas springt het model van verstoring naar verstoring en slaat de tussenliggende tijd over. Dit wordt ook wel de next-eventmethode genoemd.

Ten tweede is er bij simulatie de keuze om de verstoringen via faalkansen per schakel op het infrastructuurnetwerk te laten aangrijpen of om de verstoringen rechtstreeks op het infrastructuurnetwerk te projecteren.

Bij de eerste keuzemogelijkheid is gekozen voor simulatie met een continue tijdas (next-eventmethode). Belangrijkste reden is dat deze methode snel is doordat het de tijd tussen verstoringen overslaat.

Ten tweede is de keuze gemaakt voor het rechtstreeks laten doorwerken van echte verstoringen op het infrastructuurnetwerk in plaats van te rekenen met faalkansen per schakel. Dit is om helderheid te creëren over de impact van een verstoring. Die is nu iedere keer (bijna) hetzelfde, terwijl anders de impact per keer sterk kan verschillen omdat een verhoogde faalkans per schakel niet persé tot meer uitval leidt.

In het volgende hoofdstuk komen de invoerkeuzes voor frequentie en duur van de verstoringen aan de orde.

Blok 2 Infra

In dit blok worden de verstoringen naar plaats en tijd toegewezen aan het infrastructuurnetwerk. Het tijdstip is al berekend in het eerste verwerkingsblok. De plaats van de verstoringen volgt in deze stap.

De plaats van een verstoring kan via een Monte-Carlotrekking bepaald worden, dan heeft iedere infrastructuurschakel evenveel kans om verstoord te raken. Echter is het mogelijk dat bij bepaalde verstoringen enige schakels in het netwerk een grotere faalkans hebben. Het is bijvoorbeeld voorstelbaar dat er meer ongevallen in het centrum van een stad plaatsvinden dan daarbuiten. In dat geval hebben schakels in het centrum een hogere faalkans voor ongevallen dan andere schakels.

Bij de HTM (Kok, 2004) had men niet de indruk dat er in het centrum meer ongelukken plaatsvinden dan buiten het centrum. In dit onderzoek is daarom geen differentiatie naar plaats gemaakt voor de ongevallen. Wel is het goed om bewust te zijn van factoren die de kans op ongevallen beïnvloeden zoals een eigen baan voor het OV, verhoogde alertheid van bestuurders als het druk is en omgekeerd, menging van vervoersoorten etc. waardoor het niet vanzelfsprekend hoeft te zijn dat de kans op ongevallen overal in het infrastructuurnetwerk gelijk is.

Het is mogelijk dat door een verstoring meerdere schakels in het infranet tegelijk uitvallen. (zie hoofdstuk 4) Deze schakels kunnen afhankelijk van elkaar bepaald worden of onafhankelijk. In het model zijn deze relaties *onafhankelijk* aangenomen. Als er meerdere schakels uitvallen in het netwerk, gebeurt dit volkomen willekeurig en is via Monte-Carlotrekking bepaald welke schakels er uitvallen.

Blok 3 Diensten

Dit blok vormt de koppeling van het infrastructuurnetwerk naar het dienstennetwerk. Als invoer dienen het geplande dienstennetwerk en het verstoorde infranetwerk (volgt uit blok 'infra'). De vraag is wat er met het dienstennetwerk gebeurt als er een schakel in het infranet uitvalt.

Hier is in dit onderzoek een tweetal mogelijkheden voor:

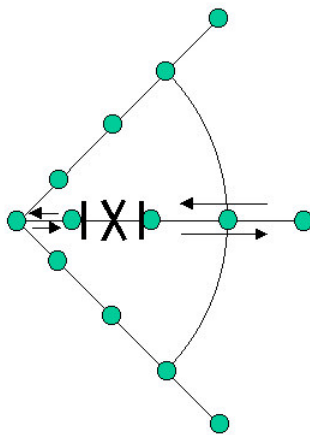
- 1 De vervoerdienst valt uit
- 2 De vervoerdienst rijdt om (dit is een reparatienetwerk genoemd)

De keuze om vervangend vervoer in te zetten als er een schakel uitvalt in het infrastructuurnetwerk, is buiten beschouwing gelaten. De meeste verstoringen zijn te kort om inzet van vervangend vervoer waarschijnlijk te maken.

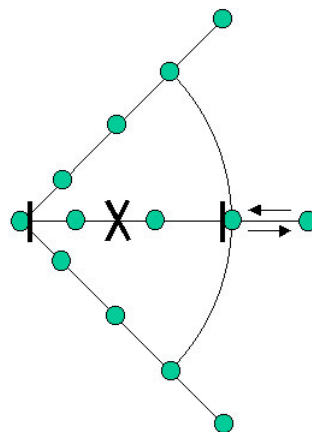
Binnen deze twee hoofdgevolgen voor het dienstennetwerk zijn er verdere differentiaties mogelijk:

Allereerst komt *uitval* van een *vervoerdienst* op verschillende wijzen voor:

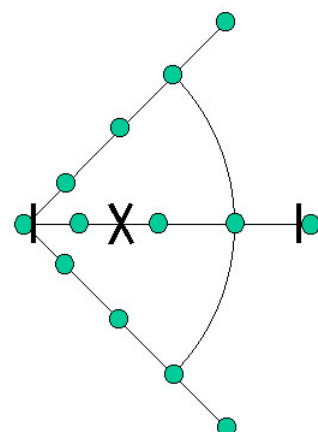
- Alleen het deel van de vervoerdienst over de schakel waar een verstoring is, valt uit. Het overige deel van de vervoerdienst blijft intact. (figuur 5.15)
- Meerdere schakels van een lijn vallen uit of een geheel lijnsegment, het overige gedeelte blijft functioneren (figuur 5.16)
- De gehele lijn valt gedurende de verstoring uit (figuur 5.17)



Figuur 5.15 Uitval 1



Figuur 5.16 Uitval 2

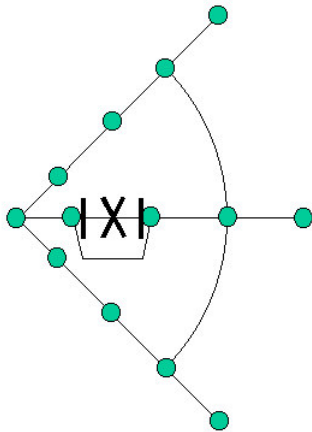
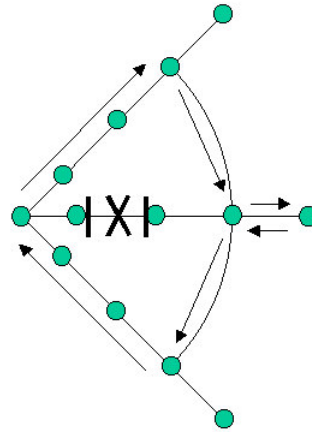


Figuur 5.17 Uitval 3

X = plaats van de verstoring, de strepen geven de grenzen van uitval van de vervoerdienst aan

Het *omrijden* van een vervoerdienst kan eveneens op verschillende wijzen gemodelleerd worden:

- Er kan *impliciet* een reparatienetwerk gemaakt worden waarbij er vooraf voor iedere schakel een alternatieve route geformuleerd is, mocht die schakel uitvallen. Dit kan 'hard' gedefinieerd worden als een omrijroute met een rijtijd van een 'x' aantal minuten of als een alternatieve route met een rijtijd van 'y' % van de normale rijtijd extra. Er is nog onderscheid in een omrijroute *binnen* het bestaande dienstennetwerk of een omrijroute *buiten* het bestaande dienstennetwerk om. (figuur 5.18 en 5.19)
- Het reparatienetwerk wordt *expliciet* gemodelleerd. Dat wil zeggen, een algoritme zoekt naar een nieuwe (beschikbare) route in het netwerk.

Figuur 5.18 Omrijroute *buiten* het dienstennetwerk omFiguur 5.19 Omrijroute *binnen* het netwerk*Modelkeuzes:*

Uitval van de vervoerdienst komt in alle drie eerder genoemde verschijningswijzen voor. (uitval schakel, uitval meerdere schakels, uitval lijn) Per type verstoring is, indien van toepassing, toegelicht hoe groot de uitval is.

Voor een *reparatienetwerk* is bij beide OV-systemen gekozen voor *impliciete* modellering van het reparatienetwerk, dus vooraf is gedefinieerd hoe groot de omrijroute is. Bij een bussysteem is aangenomen dat de bus gebruik kan maken van een route die buiten het gekozen dienstennetwerk valt, vanwege de grote dichtheid van het infranet in de stad. Daarom is per schakel een vaste omrijroute ingevoerd die 10 % is van de totale rijtijd over de desbetreffende OV-lijn. Bij een radiaallijn bijvoorbeeld is de omrijtijd 10 % van 28 minuten = 3 minuten. Die omrijtijd komt als extra rijtijd op de normale rijtijd van betreffende schakel.

Een tram kan geen gebruik maken van alternatieve routes buiten het dienstennetwerk om omdat daar in de casus geen railinfrastructuur aanwezig is. De enige alternatieve routes zijn dus binnen het gekozen dienstennetwerk. Deze omrijroutes zijn eenvoudig te berekenen en zijn op die manier 'hard' gedefinieerd in het model.

In het navolgende gedeelte is per verstoringstype aangegeven wat het effect van die verstoring is op het dienstennetwerk.

Kleine verstoringen

Effect:

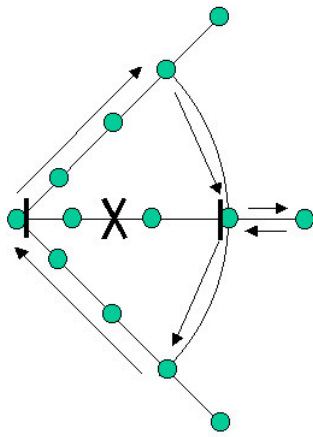
- bij een bussysteem wordt gebruik gemaakt van een reparatienetwerk
- bij een tramsysteem wordt getracht een reparatienetwerk aan te bieden. Getroffen lijnsegment valt uit.

Bij een bussysteem wordt gedurende een kleine verstoring tijdelijk gebruik gemaakt van een reparatienetwerk zoals eerder gedefinieerd. De bussen rijden dus een iets andere route dan normaal. (Kok, 2004)

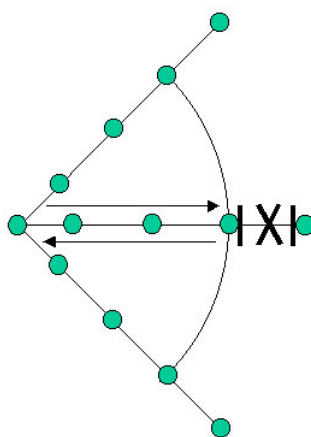
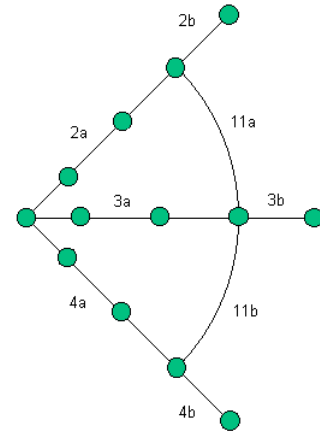
Bij een tramsysteem wordt getracht een reparatienetwerk aan te bieden aan de reiziger. (Kok, 2004) Dit is namelijk niet altijd mogelijk. In het infrastructuurnetwerk van de tram is ervan uitgegaan dat op alle knooppunten wissels liggen zodat het mogelijk is dat trams andere

routes rijden. Ontstaat er een verstoring op een radiaallijn voor de ringlijn, dan kunnen de trams omrijden en voor het laatste gedeelte hun normale traject vervolgen. (figuur 5.20) Is er een verstoring op een radiaallijn na de ringlijn, dan valt dat laatste gedeelte van de lijn uit. (figuur 5.21)

In alle gevallen valt het lijnsegment, waar de getroffen schakel onderdeel van uitmaakt, uit. Een lijnsegment is een gedeelte tussen twee knooppunten in het netwerk of tussen een knooppunt en een eindpunt. (zie figuur 5.22, voorbeeld met variant 4) Elke lijn in de figuur heeft precies 2 segmenten. (a- en b-gedeelte)



Figuur 5.20 Verstoring eerste deel

Figuur 5.21 Verstoring 2^e deel lijn

Figuur 5.22 Lijnsegmenten

Weersinvloeden

Effect:

- bij een bus- en een tramsysteem zal de reiziger meestal alternatieve routes in een netwerk moeten gebruiken

1 Storm

Bij storm nemen we aan dat er een normale vervoersdienst geleverd wordt, maar dat voor de getroffen schakels omgereden wordt. (reparatienetwerk) In een tramsysteem wordt indien mogelijk omgereden.

Vallen er twee of meer schakels op één lijn uit door stormschade, dan wordt de hele lijn buiten werking gesteld. (Kok, 2004) Dit geldt zowel voor een bus- als een tramsysteem. In die tijd kan de infrastructuur weer worden vrijgemaakt plus dat het ook niet wenselijk is om over meerdere schakels van een OV-lijn een andere route te rijden omdat dit veel onduidelijkheid geeft voor de reiziger.

2 IJzel

Het effect van de extra ongevallen als gevolg van ijzel op de dienstuitvoering van een bus- en tramsysteem is hetzelfde als eerder genoemd onder de kleine verstoringen. (dus reparatienetwerk)

Bij een draadbreek in de bovenleiding van de traminfrastructuur zal er gezocht worden naar een alternatieve route in het dienstennetwerk die de tram kan rijden. Betreffende lijnsegment valt uit.

De situatie dat 's ochtends vroeg de dienstuitvoering later kan beginnen door strenge ijzel is buiten beschouwing gelaten omdat dit gezien wordt als een incidentele latere opstart van de dienstuitvoering.

3 Sneeuw

Doordat sneeuw overal in het infrastructuurnetwerk voor overlast zorgt, is het niet eenvoudig om bussen tijdelijk om te laten rijden omdat op de omrijroutes de overlast wellicht net zo groot is. Dus vallen complete OV-lijnen uit in een bussysteem bij uitval van schakels op die lijnen.

Traminfrastructuur ondervindt ook hinder van de sneeuw. Vanwege de vele onzekerheden die de dienstuitvoering bij sneeuw al met zich meebrengt (lagere snelheid, langere remweg, minder acceleratievermogen, slecht zicht) is het niet wenselijk dat trams gaan omrijden als hun eigen route ontoegankelijk geworden is. Dit zou alleen maar tot nog meer onregelmatigheden in de dienstuitvoering leiden op de lijn waar dan meer voertuigen gebruik van maken.

4 Onweer

Bij onweer valt een segment van een tramlijn uit (zie figuur 5.22). Alle reizigers die gebruik willen maken van het getroffen lijnsegment kunnen hun verplaatsing niet maken of moeten een omweg maken.

Grote verstoringen

Effect:

- bij een bussysteem wordt een reparatienetwerk gemaakt
- bij een tramsysteem wordt geprobeerd een reparatienetwerk aan te bieden. Getroffen lijnsegment valt uit.

Door werkzaamheden of onderhoud in het infrastructuurnetwerk valt er in het dienstennetwerk een schakel uit.

Bij een bussysteem is aangenomen dat de bus tijdelijk gebruik maakt van een reparatienetwerk.

Bij een tramsysteem wordt eveneens geprobeerd om de tram een andere route te laten rijden. Door de nieuwe route valt een gedeelte van de lijn uit. Als er geen reparatienetwerk aangeboden kan worden, valt het getroffen lijnsegment uit.

In onderstaande tabellen (5.6 en 5.7) is een overzicht weergegeven van de effecten van de verschillende verstoringen op het dienstennetwerk voor een bus- en een tramsysteem:

	Bus rijdt om/Rep. netwerk	Lijn valt uit	Lijnsegment valt uit	Geen effect
Kleine verstoringen				
Storm (W1)				
IJzel (W2)				
Sneeuw (W3)				
Onweer (W4)				
Grote verstoringen				

Tabel 5.6 Overzicht effecten verstoringen op de dienstuitvoering van een bussysteem

	Tram rijdt om/Rep. netwerk	Lijn valt uit	Lijnsegment valt uit	Geen effect
Kleine verstoringen				
Storm (W1)				
IJzel (W2)				
Sneeuw (W3)				
Onweer (W4)				
Grote verstoringen				

Tabel 5.7 Overzicht effecten verstoringen op de dienstuitvoering van een tramsysteem

Aan het eind van het verwerkingsblok ‘diensten’ is de dienstuitvoering aangepast aan het gewijzigde infrastructuurnetwerk. Uit de gerealiseerde dienstuitvoering kunnen dan de exploitatiekosten berekend worden. De volgende formule is daarvoor gebruikt:

$$\text{Exploitatiekosten} = K_E = \sum_L \sum_T v_l \cdot k_t^e$$

Waarbij: v_l = het aantal voertuigen per lijn l (functie van de rijtijd, buffertijd en frequentie)

k_t^e = de exploitatiekosten per voertuig per tijdseenheid t

L = het totaal aantal lijnen

T = de simulatietijd

Het kan voorkomen dat het verschil in rijtijd tussen de geplande en de gerealiseerde dienstuitvoering voor een lijn zo groot is dat dat verschil niet kan worden opgevangen door de buffertijd van een OV-lijn. (buffertijd is het verschil in tijd tussen het einde van een rit en het begin van de volgende rit) In dat geval is het noodzakelijk dat er extra voertuigen ingezet worden (aannahme is dat er extra voertuigen beschikbaar zijn) zodat de dienstuitvoering gedurende de verstoring toch door kan gaan met dezelfde frequentie. De inzet van deze extra voertuigen brengt echter exploitatiekosten met zich mee. Deze ‘extra’ exploitatiekosten hebben dezelfde kostenwaardering per tijdseenheid dan de ‘normale’ exploitatiekosten.

Blok 4 Gebruiker

In het gebruikersdeel van het model komen de volgende aspecten aan de orde:

- Toedelingsmethode gebruikers over het dienstennetwerk met daarbij het onderscheid tussen een toedeling over een wegennetwerk en een OV-netwerk
- Kortstepadmethode die de kortste routes berekend tussen herkomsten en bestemmingen
- Gedragsaannames voor de reizigers bij gebruik van het dienstennetwerk
- Berekening kosten voor de gebruiker

Toedelingsmethode

In het model worden de gebruikers in dit deel toegedeeld over het gerealiseerde dienstennetwerk. Toedeling van gebruikers over een OV-dienstennetwerk is anders dan toedeling over een wegennetwerk. Bij een wegennet heb je in stedelijk gebied vaak te maken met congestie. Hierdoor is het maar de vraag of de kortste route qua tijd in theorie tevens de kortste route in werkelijkheid is. In een OV-netwerk speelt het aspect van congestie veel minder een rol en als het al een rol speelt, dan is het maar de vraag of het meegenomen wordt in het toedelingsprobleem. Spiess (1993) bijvoorbeeld heeft *wel* gekeken naar congestie in openbaar vervoer in zijn toedelingsmodel.

Naast congestie is een groot verschil tussen een wegennet en een OV-net dat men bij een OV-net wel eens moet overstappen om van een herkomst naar een bestemming te komen, terwijl dat in het wegennet niet zo is. Men stapt in de auto en rijdt van A naar B. Overstappen wordt door reizigers zeer negatief gewaardeerd. De reiziger zit vaak liever iets langer in het openbaar vervoer zonder overstap dan dat de reis korter duurt met een overstap. Wat het disnut is van zo'n overstap verschilt per reiziger. In een toedelingsmethode kan rekening gehouden worden met die verschillen tussen reizigers d.m.v. subjectieve nutstheorie. Nielsen (2000) past dit toe bijvoorbeeld.

Door rekening te houden met allerlei aspecten bij de keuze van de reiziger voor een bepaalde route, wordt de keuze voor een bepaalde route stochastisch. In de casus is geen van bovenstaande aspecten meegenomen. Er is namelijk gekozen voor de *alles-of-niets toedelingsmethode*. Aangenomen is dat eventuele volle voertuigen in het model geen verandering in de routekeuze voor de gebruikers geeft. De routekeuze verandert alleen als er een schakel in de route uitvalt. Verschillen in waardering van bepaalde routes door reizigers is ook buiten beschouwing gelaten. Alle reizigers kiezen voor de kortste route. (later in deze paragraaf wordt ingegaan op een aantal gedragsaannames die verondersteld zijn in dit onderzoek)

Kortstepad methode

Om een toedeling te kunnen maken, moeten alle mogelijke kortste paden tussen de herkomsten en bestemmingen gevonden zijn. Hiervoor zijn kortstepad-methodes ontworpen die die paden vinden. Een aantal zijn: Dijkstra's algoritme (Dijkstra, 1959), A* algoritme (Rich en Knight, 1991 / Russel en Norvig, 1995) en het landmarkalgoritme. (Goldberg en Harrelson, 2004) Deze kortstepad methodes zijn allemaal ontwikkeld voor wegennetwerken met schakels, terwijl een OV-netwerk bestaat uit lijnen waarover verplaatsingen gemaakt kunnen worden. Een ander belangrijk verschil is dat een OV-netwerk niet altijd beschikbaar is naar tijd. Dat is afhankelijk van de frequentie van de aangeboden vervoerdienst. Wachtijd is een aspect dat bij een wegennetwerk niet relevant is. Een wegennetwerk is altijd beschikbaar. Wachtijd komt ook terug bij een ander belangrijk verschil tussen een wegennet en een OV-net, namelijk overstap. In een wegennetwerk kan men vrij van route wisselen op een knooppunt zonder dat dat tijdverlies oplevert. In een dienstennetwerk heeft men een bepaalde overstaptijd op een knooppunt bij verandering van lijn. Wachtijden en overstaptijden worden bepaald door de frequenties van de lijnen.

Door enige aanpassingen te doen aan de conventionele kortstepad methodes zijn ze ook wel geschikt om een OV-netwerk door te rekenen, maar voor deze casus is een aparte kortstepad methode ontwikkeld. Deze functioneert goed in de huidige casus (heeft bijvoorbeeld een acceptabele rekentijd) en is ook toepasbaar voor doorrekening van grotere netwerken, maar dan is minder duidelijk hoe snel de methode is.

De methode bestaat uit een drietal hoofdprocedures:

- | | |
|-------------|---|
| Procedure 1 | Bepaal alle x_{ij}
$\forall i, j \in \{V_L\}$ |
| Procedure 2 | Check if $\min(x_{ik} + x_{kj} + t_p, x_{ik} + x_{kl} + x_{lj} + 2t_p) < x_{ij}$,
$x_{ij} = \min(x_{ik} + x_{kj} + t_p, x_{ik} + x_{kl} + x_{lj} + 2t_p)$
$\forall i, j \in \{V_L\}$ en $\forall k, l \in \{O\}$ |

Procedure 3

Bepaal voor alle $x_{ij} \equiv 1000$,

$$t_{ij} = \min(x_{ik} + x_{kj} + t_p, x_{ik} + x_{kl} + x_{lj} + 2t_p)$$

$$\forall i, j \in \{V\} \text{ en } \forall k, l \in \{O\}$$

x_{ij} = het kortste pad (in tijd gezien) tussen knopen i en j die op eenzelfde lijn liggen

t_{ij} = het kortste pad (in tijd gezien) tussen knopen i en j die *niet* op eenzelfde lijn liggen

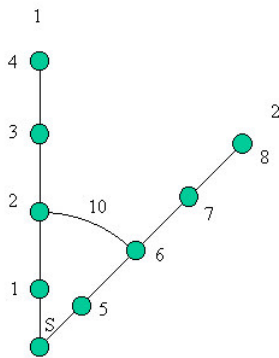
t_p = overstappenalty (in tijd)

$\{V_L\}$ = de verzameling toegangspunten die op lijn L liggen

$\{V\}$ = de gehele verzameling toegangspunten

$\{O\}$ = de verzameling knooppunten

Door middel van deze drie procedures wordt het kortste pad berekend voor alle HB-relaties. In de eerste procedure worden de reistijden van alle verplaatsingen binnen één OV-lijn toegewezen. (deze zijn directe verplaatsingen genoemd) Als voorbeeld is een klein gedeelte van het dienstennetwerk uitgelicht met daarin lijn 1 en 2 en een ringlijn. Zie figuur 5.23



Figuur 5.23 Deel van het dienstennetwerk

Na de eerste procedure van het algoritme ziet de kortstepad-matrix er als volgt uit:

Knoop	S	1	2	3	4	5	6	7	8
S		4	12	20	28	4	12	20	28
1	4		8	16	24				
2	12	8		8	16		9		
3	20	16	8		8				
4	28	24	16	8					
5	4						8	16	24
6	12		9			8		8	16
7	20					16	8		8
8	28					24	16	8	

Figuur 5.24 Kortstepad-matrix na procedure 1 (reistijd in minuten)

Alle directe verplaatsingen die binnen één lijn te maken zijn, zijn opgenomen als kortste pad.

In de tweede procedure van de kortstepadmethode worden de zojuist bepaalde paden gecontroleerd of ze daadwerkelijk wel de kortste paden zijn tussen herkomst en bestemming of dat er via knooppunten nog kortere paden te vinden zijn. Dit is noodzakelijk omdat in de derde procedure de kortstepaden tussen knopen op eenzelfde lijn gebruikt worden voor bepaling van de verplaatsingen met overstap.

In dit voorbeeld zijn alle gevonden paden daadwerkelijk direct de kortste, maar in het geval van twee knopen op de ringlijn die recht tegenover elkaar liggen, dus op lijn 1 en 5 bijvoorbeeld, vindt het algoritme in eerste instantie een direct pad via de ringlijn, die heeft dan een reistijd van $4 * 9 = 36$ minuten. Bij controle blijkt er dan een korter pad te zijn dat loopt via lijn 1 en 5 met een overstap op knoop S. Deze reistijd is $12 + 5$ (overstappenalty) $+ 12 = 29$ minuten. In dat geval wordt de kortstepad-matrix aangepast aan het nieuw gevonden pad. Na stap 2 zijn alle gevonden paden tot dan toe gegarandeerd de kortste.

In de derde procedure van het kortstepad-algoritme volgt de berekening van kortste paden waarbij overgestapt moet worden:

Voor ieder toegangspunt is aangegeven tot welke lijn(en) deze behoort en of het toegangspunt een overstappunt is of niet. Omgekeerd is per lijn bekend waar de overstappunten op die lijn liggen. In tabel 5.8 zijn per lijn de toegangspunten weergegeven en in tabel 5.9 de overstappunten.

Knoop	S	1	2	3	4	5	6	7	8
Lijn 1	1	1	1	1	1				
Lijn 2	1					1	1	1	1
Lijn 10			1				1		

Tabel 5.8 Toegangspunten

Knoop	S	1	2	3	4	5	6	7	8
Lijn 1	1		1						
Lijn 2	1						1		
Lijn 10			1				1		

Tabel 5.9 Overstappunten

De berekening van het kortste pad tussen knoop 1 en 5 gaat dan als volgt: Er wordt vastgesteld tot welke lijn(en) knoop 1 en 5 behoren. Dat is lijn 1 en 2. Vervolgens wordt per lijn vastgesteld wat de overstapknopen zijn. Als die direct matchen met elkaar is er een gezamenlijk overstappunt en kan direct het kortste pad berekend worden uit de kortstepadmatrix met daarbij een overstappenalty gerekend. In dit geval is er een gezamenlijk overstappunt te vinden, namelijk knoop S, en is het kortstepad, $4 + 5 + 4 = 13$ minuten. Tevens zoekt het algoritme alle combinaties tussen overstappunten op lijn 1 en 2 af om te kijken of er geen korter pad is. Dit laatste wordt toegelicht aan de hand van de bepaling van het kortste pad tussen knoop 3 en 7.

Knoop 3 ligt weer op lijn 1 en knoop 7 op lijn 2. Er is dus een gezamenlijk overstappunt S, dit levert een kortstepad op van $20 + 5 + 20 = 45$ minuten. In het dienstennetwerk is direct te zien (figuur 5.23) dat er waarschijnlijk via 2 keer overstappen een korter pad mogelijk is. Die vindt het algoritme doordat alle combinaties van overstappunten met elkaar worden gecombineerd ook al matchen ze niet direct. Op lijn 1 wordt naast knoop S ook knoop 2 gevonden als overstappunt en op lijn 2 is knoop 6 ook een overstappunt. Het algoritme telt in dat geval het kortste pad tussen herkomst (knoop 3) en eerste overstapknop (knoop 2) op bij

het kortste pad tussen de 2 overstappunten (knoop 2 en 6) en bij het kortste pad tussen de tweede overstapknoop (knoop 6) en de bestemming (knoop 7). Tenslotte komt hier 2 keer een overstappenalty bij van 5 minuten. Dit levert een kortste pad op van $8 + 9 + 8 + 5 + 5 = 35$ minuten. Dit is korter dan het eerder bepaalde pad.

In de kortstepad methode is aangenomen dat er maximaal 2 keer overgestapt wordt door een reiziger bij zijn verplaatsing binnen dit dienstennetwerk. (in theorie kunnen er verplaatsingen met 4 overstaps gevonden worden) Bij een groter netwerk kan deze aanname problemen opleveren omdat dan niet alle paden gevonden kunnen worden. Echter is het de vraag hoe realistisch het is om te veronderstellen dat reizigers meer dan 2 keer overstappen binnen één en hetzelfde dienstennetwerk. Dan kiest men eerder voor een andere vervoerwijze.

In de derde stap van de kortstepad methode worden alle overige verplaatsingen waarbij overgestapt moet worden, bepaald.

Na volledige doorrekening ziet de kortstepad matrix voor dit gedeelte van het netwerk er als volgt uit:

Knoop	S	1	2	3	4	5	6	7	8
S		4	12	20	28	4	12	20	28
1	4		8	16	24	13	21	29	37
2	12	8		8	16	21	9	22	30
3	20	16	8		8	29	22	35	43
4	28	24	16	8		37	30	43	51
5	4	13	21	29	37		8	16	24
6	12	21	9	22	30	8		8	16
7	20	29	22	35	43	16	8		8
8	28	37	30	43	51	24	16	8	

Figuur 5.25 Kortstepad matrix (reistijd in minuten)

Gedragsaannames

Eerder in dit hoofdstuk is al genoemd dat er in het model een aantal gedragsaannames van de reizigers verondersteld zijn. Daar wordt hier op ingegaan. Allereerst de aannames omtrent routekeuze van de reizigers bij een wijziging in hun 'normale' route. Daarna volgt een aanname omtrent de maximale omrijfactor in het netwerk.

Bij een reparatienetwerk zijn er twee keuzemogelijkheden voor het gedrag van de reiziger: Hij wijzigt zijn route of hij kiest nog steeds de route die hij normaal ook kiest.

Deze keuze is afhankelijk van de informatievoorziening aan de reiziger bij een verstoring en de kennis van een reiziger van het dienstennetwerk. Als de reiziger namelijk geïnformeerd wordt over een verstoring en de consequenties die dat heeft voor zijn verplaatsing, kan de reiziger besluiten om een andere route te nemen, die korter is. Als er geen informatie over verstoringen verstrekt wordt, neemt de reiziger de route die hij gewoonshalve altijd neemt.

Bij gebrekkige kennis van een reiziger over het dienstennetwerk heeft hij niet de mogelijkheid om in te schatten of een andere route korter is en neemt hij toch de route die hij normaal ook neemt, ook al weet hij dat die route nu iets langer duurt. Een incidentele verstoring wordt dan voor lief genomen door de reiziger.

Deze afweging voor wel of geen nieuwe toedeling van de reizigers kan evenzo gemaakt worden voor de andere wijziging in het dienstennetwerk, namelijk uitval van een vervoerdienst.

Modelkeuze:

Bij een *reparatienetwerk* in het dienstennetwerk is voor het gedrag van de reizigers in het netwerk aangenomen dat ze niet voldoende kennis bezitten over de alternatieve routes in het netwerk (en dat ze weinig zin hebben om die kennis te vergaren), dat er weinig tijd is voor de exploitant om de reizigers te informeren over alternatieve routes (vanwege de relatief korte duur van de meeste verstoringen) en dat de meeste reizigers uit gewoonte en vertrouwdheid kiezen voor een bepaalde route zodat er geen nieuwe toedeling van de reizigers plaatsvindt bij een reparatienetwerk in het dienstennetwerk. De meeste reizigers accepteren een incidentele vertraging. De reizigers over de route waarvoor nu een gedeelte wordt omgerekend, krijgen allemaal een extra reistijd ter grootte van de omrijtijd.

Bij *uitval* van een gedeelte van het dienstennetwerk is gekozen om de reizigers opnieuw toe te delen over het netwerk. Het is simpelweg niet mogelijk om de reizigers dezelfde route te laten nemen, omdat die route ergens onderbroken is. Aangenomen is dat reizigers naar alternatieve routes zoeken in het dienstennetwerk om toch op hun bestemming te komen en dus ook de benodigde informatie vergaren over alternatieve routes.

In het model is een *omrijfactor* verondersteld bij het maken van verplaatsingen door de reizigers. De omrijfactor is de verhouding tussen de werkelijk gerealiseerde reistijd of afstand tussen A en B en de kortst mogelijke reistijd of afstand tussen A en B. Deze factor geeft een bovengrens aan waaraan de maximale reistijd of afstand aan moet voldoen.

Bij de toedeling van de reizigers over het netwerk is deze toegepast. Indien de reistijd over een bepaalde route boven de grenswaarde uitkomt, dan wordt deze route niet gekozen. Ook als deze route de kortst mogelijke route is tussen een bepaalde herkomst en bestemming. Dan wordt de verplaatsing gezien als een niet gemaakte verplaatsing. Op deze wijze wordt voorkomen dat er onrealistisch lange routes gevonden worden voor HB-paren.

Modelkeuze:

In het model is een omrijfactor gekozen van 1,5. Dit is aan de hoge kant, omdat meestal met een omrijfactor in de orde grootte van 1,3 gerekend wordt. Toch is deze hoge factor gekozen omdat de casus een stedelijk netwerk betreft waarbij de absolute grootte van de gemiddelde reistijd in het netwerk niet zo groot is. (27 minuten) Een toename met de helft van de normale reistijd is in absolute zin dan ook veel minder groot in vergelijking met een netwerk op een groter schaalniveau. Daar zou een kleinere omrijfactor gewenst zijn.

Er is dus aangenomen dat mensen liever een andere vervoerwijze nemen of hun verplaatsing niet maken dan dat ze meer dan 50 % extra reistijd ondervinden.

Berekening kosten voor de gebruiker

De kosten voor de gebruiker vallen uiteen in reiskosten en kosten voor niet gemaakte verplaatsingen. Beide kostencomponenten worden in dit deel van het model bepaald.

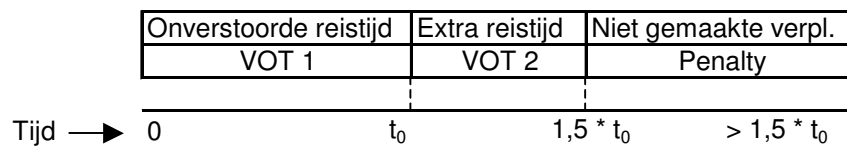
De reiskosten zijn in de meeste gevallen een lineaire functie van de reistijd. Deze worden verdisconteerd via een VOT-(Value Of Time) waarde. Deze waarde geeft aan wat de gemiddelde waarde is van bijvoorbeeld een uur tijd voor een bepaalde groep mensen. Voor zakenmensen ligt de VOT bijvoorbeeld hoger dan voor winkelend publiek. Voor reizigers is een gewogen gemiddelde van VOT-waardes gekozen.

Extra reiskosten zijn de reiskosten die verbonden zijn aan de reistijd die langer is dan de minimale reistijd. Deze worden hoger gewaardeerd dan de normale reiskosten omdat deze ongewenst zijn.

Vallen er door verstoringen verplaatsingen uit, dan krijgt zo'n verplaatsing een penalty voor een niet gemaakte verplaatsing. Deze penalty representeert dan o.a. de kosten voor eventueel vervangend vervoer (een taxi bijvoorbeeld) en de kosten voor extra reistijd. In de casus zijn er 2 oorzaken waardoor verplaatsingen niet gemaakt kunnen worden:

- ♣ Er kan geen route gevonden worden tussen herkomst en bestemming
- ♣ Er wordt een route gevonden, maar de reistijd is groter dan de toegestane norm van 50 % (de omrijfactor), dus de verplaatsing wordt niet gemaakt

Een overzicht van de waardering van reistijd in het model met de verschillende kostencomponenten, is in figuur 5.26 te zien:



Figuur 5.26 Waardering van reistijd

Er is een verschil in waardering van kosten en waardering voor de betrouwbaarheid en robuustheid van het netwerk voor verplaatsingen die een reistijd kennen die langer is dan 50 % van hun normale reistijd.

Voor de kosten worden zulke verplaatsingen namelijk gezien als een niet gemaakte verplaatsing, dus gewaardeerd met een penalty. Terwijl tegelijkertijd deze verplaatsingen meetellen voor het reistijdverlies en de normoverschrijding van 15 % van de reistijd. Voor de robuustheid van het dienstennetwerk tellen deze verplaatsingen *niet* mee.

De volgende formules geven aan hoe de verschillende kostencomponenten berekend zijn:

$$\text{Normale reiskosten} = \underline{K}_R = \sum_i \sum_j \sum_t \underline{U}_{ijt} \cdot t_{ij}^0 \cdot k_r \quad \forall i, j$$

$$\text{Extra reiskosten} = \underline{K}_V = \sum_i \sum_j \sum_t \underline{U}_{ijt} \cdot (t_{ijt} - t_{ij}^0) \cdot k_v \quad \forall i, j$$

$$\text{Kosten voor niet gemaakte verplaatsingen} = \underline{K}_N = \sum_i \sum_j \sum_t \underline{U}_{ijt}^N \cdot k_n \quad \forall i, j$$

k_r en k_v zijn 'value of time' waardes, deze zijn constant

k_n = een penalty voor een niet gemaakte verplaatsing

t_{ij}^0 = de kortste tijd om van herkomst i naar bestemming j te komen in de uitgangssituatie

t_{ijt} = de kortste tijd om van herkomst i naar bestemming j te komen op tijdstip t

$\underline{U}_{ijt}$ = het aantal verplaatsingen van herkomst i naar bestemming j op tijdstip t

$\underline{U}_{ijt}^N$ = het aantal niet gemaakte verplaatsingen van i naar j op tijdstip t

De normale reiskosten zijn alle reiskosten gewaardeerd volgens VOT 1.

De extra reiskosten zijn alle reiskosten gewaardeerd volgens VOT 2

5.5.3 Uitvoer

De uitvoer van het model bestaat uit drie componenten, namelijk de exploitatiekosten, de gebruikskosten oftewel reiskosten en de kosten voor niet gemaakte trips. Details en berekeningswijzen van deze componenten zijn al eerder aan de orde gekomen. Hier wordt volstaan met aan te geven van welke stochastische variabele en invoercomponent de kosten een functie zijn. Zie tabel 5.10

Uitvoer	Functie van	Stochastische variabele	Invoercomponent
$\underline{K}_e$	$f(\underline{I}, D)$	$\underline{I}$ = gerealiseerd infranetwerk	D = gepland dienstennetwerk
$\underline{K}_g$	$f(\underline{D}, P)$	$\underline{D}$ = gerealiseerd dienstennetwerk	P = gebruikersvraag
$\underline{K}_n$	$f(\underline{D}, P)$	$\underline{D}$ = gerealiseerd dienstennetwerk	P = gebruikersvraag

Tabel 5.10 Uitvoer

Hoofdstuk 6 Toepassing van het model en invoerkeuzes

6.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft alle invoerkeuzes die gemaakt moeten worden bij toepassing van het model op logische volgorde van de modelcomponenten. (par. 6.2) In paragraaf 6.3 volgt een opsomming met alle gekozen waardes van parameters in het model.

6.2 Invoerkeuzes voor het model

Net als bij hoofdstuk 5 zullen de componenten, invoer en verwerking, aan de orde komen met de respectievelijke *invoerkeuzes* en aannames.

6.2.1 Invoer

Kansverdeling voor tussentijden en duur van de verstoringen

Voor de *tussentijden* van de verstoringen is aangenomen dat deze negatief exponentieel verdeeld zijn. Dit is zeer gebruikelijk om een reeks met gebeurtenissen te genereren. (Internetbron 1). De negatief exponentiële verdeling heeft namelijk geen geheugen. De tijd die verstreken is sinds de laatste gebeurtenis, speelt geen rol. Dus de verstoringen zijn onafhankelijk van elkaar. In verreweg de meeste gevallen is dit een juiste aanname.

Voor de *duur* van een verstoring is gerekend met de lognormale verdeling. Deze is gekozen omdat de lognormale verdeling altijd positieve uitkomsten geeft, zodat er geen negatieve tijdsduren gesimuleerd kunnen worden en de verdeling komt goed overeen met het werkelijke fenomeen waarbij er veel waardes qua tijdsduur rond het gemiddelde liggen en er slechts een paar extreme waardes zijn.

Gegeven infrastructuurnetwerk, gekozen dienstennetwerk, vervoervraag

Bij deze invoerdelen zijn er geen invoerkeuzes.

6.2.2 Verwerkingsblokken

Blok 1 Verstoringen

In het navolgende gedeelte is per verstoringstype vastgesteld wat de feiten betreffende duur en frequentie zijn, wat eventueel aangenomen is en wat de uiteindelijke waardes zijn van duur en frequentie zoals ze in het model gekomen zijn.

Kleine verstoringen

Kenmerken:

- treden zeer vaak op (meerdere malen per dag)
- zijn niet afhankelijk van seizoenen
- duren kort (1 à 1,5 uur)

Kleine verstoringen betreft de ongevallen. Dit kunnen ongevallen zijn tussen auto's onderling, maar hierbij kan ook het openbaar vervoer zelf betrokken zijn. Onder ongevallen verstaan we dus aanrijdingen of andere zaken waardoor één of meerdere voertuigen stil komen te staan en de infrastructuur blokkeren.

Uit ongevallencijfers van de gemeente Den Haag (Werkgroep Verkeersveiligheid Den Haag, 2003) blijkt dat er in 2001 1013 letselongevallen waren en 7374 schadeongevallen. Dit is in totaal 8387 ongevallen per jaar.

Uit navraag bij de HTM (Kok, 2004) blijkt dat er gemiddeld 7 keer per dag een ongeval plaatsvindt waar een bus of tram hinder van ondervindt. Dit zijn dus over een jaar $7 * 365 = 2555$ ongevallen.

Dit betekent dat bij 30 % van alle ongevallen in de stad Den Haag, het OV verstoord wordt. De storings- en ongevallendienst van de vervoerder wil er zo snel mogelijk na een ongeval voor zorgen dat de dienstuitvoering weer hervat kan worden en sleept indien mogelijk voertuigen die betrokken zijn bij het ongeluk aan de kant.

Bij gemiddeld 12 % (Kok, 2004) van de ongevallen ontstaat er letselschade. Dan is het niet mogelijk om de voertuigen aan de kant te slepen omdat er onderzoek verricht moet worden naar het ongeval en omdat de gewonden afgevoerd moeten worden.

Als we kijken naar de plaats van de ongevallen, blijkt uit cijfers (van Schagen, 2000) dat 53 % van de slachtoffers, bij ongevallen op wegen met een snelheid tot 50 km/h (dus typisch stedelijke infrastructuur), valt op de *kruispunten*. De overige 47 % valt op de *wegvakken*.

De duur van een ongeval is gemiddeld zo'n anderhalf uur vanaf het moment dat het ongeluk plaatsvindt tot het moment dat de infrastructuur weer wordt vrijgegeven. (Kok, 2004)

Ongevallen bus

Verder is aangenomen dat op *kruispunten* in 13 % van het totaal aantal ongevallen, waarbij er geen gewonden zijn, de schade zo groot is dat het kruispunt niet direct kan worden vrijgegeven. Dit betekent dus dat in totaal bij 12 % (letselschade) + 13 % (grote schade) = 25 % van de ongevallen op een kruispunt de bus gedurende een bepaalde tijd geen gebruik kan maken van dat kruispunt.

De ongevallen waarbij het OV niet gestoord wordt, omdat de voertuigen die betrokken zijn bij een ongeval niet in de weg staan of direct worden weggesleept, zijn niet meegenomen. Dit zorgt hoogstens voor een incidentele vertraging.

Bij ongevallen op een *wegvak* waar de bus gebruik van maakt, zal het percentage dat de bus ongestoord zijn route kan vervolgen, iets lager liggen dan bij een kruispunt, omdat de uitwijkruimte kleiner is. Op een wegvak zal in totaal bij 30 % van de ongevallen de bus hinder ondervinden.

Dit betekent dat voor een busnetwerk gerekend is met $2555 * 0.53 * 0.25$ (ongevallen kruispunt) + $2555 * 0.47 * 0.30$ (ongevallen wegvak) = 700 ongevallen per jaar die een verstoring in het infrastructuurnetwerk opleveren.

Ongevallen tram

De tram ondervindt net zoveel hinder van ongevallen op kruispunten en wegvakken als een bus. Het enige verschil is dat een tram minder gebruik maakt van wegvakken omdat het vaak een eigen baan heeft. Voor de casus is aangenomen dat de tram op 80% van het infranetwerk vrije baan heeft. Dit is een normaal percentage voor een stedelijk tramnetwerk. (Kok, 2004)

Het aantal ongevallen op wegvakken is dus voor een tram fors lager dan voor een bus.

Dat resulteert in $2555 * 0.53 * 0.25$ (ongevallen kruispunten) + $2555 * 0.47 * 0.2 * 0.30$ (ongevallen wegvakken) = 411 ongevallen per jaar die een verstoring in het infrastructuurnetwerk opleveren

Voor beide vervoertechnieken geldt dat één schakel in het infrastructuurnetwerk in werkelijkheid twee schakels (voor elke richting één) vertegenwoordigd. Bij een ongeluk faalt vaak één van die twee schakels. Dit is vereenvoudigd in het model. Als er in het model

namelijk een schakel uitvalt in het infranetwerk, dan valt die schakel voor beide richtingen uit. Dit geldt evenzo voor alle andere verstoringstypen.

Om dit aspect te verdisconteren voor de kleine verstoringen, is het aantal ongevallen waar mee gemodelleerd is, gehalveerd. Hierdoor resulteren er voor een busnetwerk gemiddeld 350 ongevallen per jaar die een verstoring opleveren, dus 0,97 ongevallen per dag en voor een tramnetwerk gemiddeld 206 ongevallen per jaar die het infranetwerk verstoren, dit zijn 0,57 ongevallen per dag.

Over het jaar heen is er een even grote kans op ongevallen. In werkelijkheid spelen er veel meer factoren mee waardoor het aantal ongevallen wisselt over een jaar, maar dat is buiten beschouwing gelaten. Eventuele extra ongevallen die ontstaan als gevolg van weersinvloeden, zijn verdisconteerd bij het desbetreffende weertype.

Weersinvloeden

Kenmerken:

- treden niet vaak op (ongeveer 1 keer per jaar)
- zijn wisselend seizoensafhankelijk
- duren middellang (meerdere uren à 1,2 dagen)

De volgende weersinvloeden zijn onderscheiden in hoofdstuk 4:

- 1 Storm
- 2 IJzel
- 3 Extreme sneeuwval
- 4 Onweer

1 Storm, De kans op storm is gemiddeld eens in het jaar gekozen.

De uitvaltijd van de schakels zal gemiddeld 4 uur zijn. Dit kan namelijk variëren van simpele opruimwerkzaamheden tot moeilijke opruimwerkzaamheden (wegtakelen van takken of omgevallen bomen) en reparatie aan de weginfrastructuur of bovenleiding. Bij deze weersinvloed is er geen onderscheid tussen een bus- en een tramnetwerk in kans van optreden en duur van de verstoring.

2 IJzel, IJzel is sterk seizoensgebonden. Alleen in de winterperiode treedt dit op.

Aangenomen wordt dat per winterperiode 5 keer ijzel optreedt.

IJzel is een fenomeen wat gedurende een aantal uren optreedt. Meestal wordt er vrij snel gepekeld op de wegen zodat de wegen weer goed toegankelijk zijn. We nemen aan dat de gemiddelde duur van een ijzelperiode 2 uur is.

Bij een tramnetwerk is er naast de extra ongevallen als gevolg van de ijzel nog een andere invloed op het netwerk. Dat is een mogelijke draadbreek in de bovenleiding. 1 à 2 keer per jaar komt dit voor.

3 Extreme sneeuwval, Er is aangenomen dat gemiddeld eens in de 2 jaar sneeuw valt waardoor het infrastructuurnetwerk zo slecht toegankelijk is dat de dienstuitvoering van het OV daar hinder van ondervindt. Dan is de schade voor een busnetwerk net zo zwaar als voor een tramnetwerk. Uiteraard treedt deze weersinvloed alleen in de winter op.

De uitval van de schakels zal gemiddeld 3 uur duren.

4 Onweer, Voor de modellering nemen we aan dat er 2 keer per jaar een onweer is waarbij er een kritieke plaats (zie hoofdstuk 4) in het tramnetwerk getroffen wordt.

Voor de duur van een verstoring als gevolg van onweer is ervan uitgegaan dat het gemiddeld 4 uur duurt voordat het ongemak gerepareerd is en de dienstvoering weer hervat kan worden.

Grote verstoringen

Kenmerken:

- Treden niet vaak op (aantal keren per jaar)
- Zijn niet seizoensafhankelijk
- Duren lang (variërend van meerdere dagen tot enkele weken)

Grote verstoringen betreffen de onderhouds- en reparatiewerkzaamheden aan de infrastructuur. Gemiddeld komt dit twee keer in het jaar voor.

Het maakt niet uit voor het onderhoud of het om een bus- of een tramnetwerk gaat. Beide netwerken vergen ongeveer evenveel onderhoud en ze maken ook wel eens samen gebruik van (bijna) dezelfde infrastructuur. (bijv. een tram in de rijbaan)

De werkzaamheden kunnen het hele jaar door plaatsvinden. In werkelijkheid zal er in de zomerperiode misschien meer onderhoud gebeuren dan in de winter, maar deze differentiatie is buiten beschouwing gelaten.

De onderhoudswerkzaamheden kunnen over het hele netwerk plaatsvinden en duren gemiddeld 2 weken.

De frequentie en duur van alle verstoringen is samengevat in de volgende overzichtstabel:

Type verstoring	Frequentie (/jaar)		Duur
	bus	tram	
Kleine verstoringen	350	206	1,5 uur
Wind	1	1	4 uur
IJzel	5	5	2 uur
Sneuw	0,5	0,5	3 uur
Onweer	0	2	4 uur
Grote verstoringen	2	2	2 weken

Tabel 6.1 Frequentie en duur van de verstoringen

Blok 2 Infra

De verstoringen worden in dit blok naar plaats en tijd toegewezen aan het infrastructuurnetwerk. Het tijdstip en duur van optreden zijn al bekend. Per type verstoring is hieronder bepaald wat er in het infrastructuurnetwerk gebeurt als er een verstoring optreedt. Alle verstoringen hebben een gelijke impact op zowel een bus- als een traminfranetwerk. Alleen bij onweer blijft een busnetwerk gevrijwaard van een verstoring.

Kleine verstoringen

Kleine verstoringen treden lokaal op. Hierdoor valt één schakel in het infrastructuurnetwerk uit.

Weersinvloeden

1 Wind, Bij een storm vallen tegelijkertijd meerdere schakels uit in een infrastructuurnetwerk omdat een storm namelijk niet op een klein deel van het netwerk optreedt, maar over het gehele netwerk. Er is aangenomen dat 15 % van de infraschakels uitvalt.

2 IJzel, In een ijzelperiode is geschat dat er gemiddeld 10 % meer ongevallen gebeuren dan normaal. De ongevallen als gevolg van ijzel kunnen overal op het netwerk optreden. Als

gevolg van de ongevallen valt één schakel in het infrastructuurnetwerk uit. (net als bij de kleine verstoringen)

Door een draadbreuk in de bovenleiding van het tramnet als gevolg van ijzel, valt er één schakel in het traminfrastructuurnetwerk uit.

3 Extreme sneeuwval, Er is aangenomen dat op 15 % van de infrastructuurschakels problemen ontstaan waardoor ze uitvallen.

4 Onweer, Bij onweer wordt een kritieke plaats in het tramnetwerk getroffen, maar dit hoeft niet altijd direct op de infrastructuur zelf betrekking te hebben. Een transformatorhuisje dat getroffen wordt door de bliksem zorgt wel indirect voor uitval in het infranetwerk. In het model is de oorzaak van de verstoring in het infranet buiten beschouwing gelaten en is verondersteld dat een segment van de traminfrastructuur direct uitvalt. (zie figuur 5.22 voor beschrijving lijnsegmenten)

Grote verstoringen

Grote verstoringen vinden plaats op één schakel in het infrastructuurnetwerk. Die kan gedurende de tijd voor onderhoud of reparatie niet gebruikt worden.

Blok 3 Diensten

Geen invoerkeuzes in dit blok van het model

Blok 4 Gebruikers

Geen invoerkeuzes in dit blok van het model. Alle parameters die gebruikt zijn in de analyse komen in de volgende paragraaf aan bod.

6.3 Gebruikte parameters in de analyse

Hieronder volgt de lijst met alle gebruikte parameters in het model. Na de opsomming volgt een toelichting bij de gekozen parameters.

- ♣ 1 Simulatieduur is een jaar
- ♣ 2 Een jaar bestaat uit 360 dagen
- ♣ 3 Een jaargetijde bestaat uit 90 dagen
- ♣ 4 De lente is van $t = 0$ tot $t = 90$ etc.
- ♣ 5 Een dag bestaat uit 18 uur
- ♣ 6 Value of time (1) = € 10
- ♣ 7 Value of time (2) = € 20
- ♣ 8 Penalty voor een niet-gemaakte verplaatsing = € 20
- ♣ 9 Exploitatiekosten bus = € 80/uur/voertuig
- ♣ 10 Extra exploitatiekosten bus = € 80/uur/voertuig
- ♣ 11 Exploitatiekosten (1) tram = € 125/uur/voertuig
- ♣ 12 Exploitatiekosten (2) tram = € 150/uur/voertuig
- ♣ 13 Frequentie bus/tram = 6 / uur
- ♣ 14 Overstappenalty = 5 minuten

ad 1: Een jaar is een mooie tijdsduur voor deze simulatie, alle seizoenen komen dan precies één keer voor. Bij meerdere simulaties kunnen deze achter elkaar gedacht worden (vanwege de onafhankelijkheid van de verstoringen) waardoor er alsnog een breder spectrum ontstaat.

Ad 2/3: Een jaar is op 360 dagen gesteld omdat de seizoenen dan precies 90 dagen lang zijn.

Ad 4: De tijd begint te lopen bij het begin van de lente. Dus een jaar loopt van maart tot maart.

Ad 5: Er is niet de gehele dag een aanbod van vervoerdiensten. Aangenomen is dat de dienstuitvoering 18 uur beslaat, van 6.00 – 0.00 uur.

Ad 6: Dit is de value of time voor ongestoorde trips. Deze waarde is uit de literatuur afgeleid. (van Nes, 2002)

Ad 7: De VOT-waarde voor extra reistijd is het dubbele aangenomen van de normale VOT-waarde

Ad 8: De factoren die de penalty voor een niet-gemaakte verplaatsing bepalen, zijn eerder al aan de orde gekomen. De waarde van € 20 is vooral bepaald uit de gemiddelde reiskosten van gebruikers in het netwerk.

Ad 9/10: De exploitatiekosten/uur voor een bus zijn afgeleid uit van Nes (2002)

Ad 11: Deze waardering van exploitatiekosten is van toepassing als de railinfrastructuur voor de tram reeds aanwezig is in het netwerk. In de casus is de infrastructuur van de radiaallijnen al aanwezig. Hier hoeven geen investeringskosten voor te worden gemaakt. De waardering van exploitatiekosten is gebaseerd op van Nes (2002)

Ad 12: Als de railinfrastructuur nog aangelegd moet worden, dan is deze waardering van exploitatiekosten gebruikt in het model. Deze waarde is van toepassing voor de exploitatiekosten van de ringlijnen omdat daar nog geen railinfrastructuur aanwezig is. Voor deze railinfrastructuur dienen investeringskosten gemaakt te worden. Deze investeringskosten zijn verdisconteerd in de exploitatiekosten/uur en dus niet apart gewaardeerd. De waardering is afgeleid uit van Nes (2002)

Ad 13: De frequentie van de vervoerdiensten is 6 / uur gekozen omdat dit een normale maat is voor stedelijk openbaar vervoer. Eens in de 10 minuten rijdt er dan een bus of tram.

Ad 14: De overstappenalty is gelijk aan de gemiddelde wachttijd bij overstappen en die is gelijk aan 5 minuten.

Hoofdstuk 7 Resultaten van de analyse, discussie en reflectie

7.1 Inleiding

In dit hoofdstuk volgen de resultaten van de analyse die met het model is uitgevoerd. De onverstoorte situatie geeft een beeld van de prestatie van het dienstennetwerk in de ideaalsituatie aan de hand van een aantal kentallen: gemiddelde reistijd, voertuigkilometers en verplaatsingskilometers. (par. 7.2) In paragraaf 7.3 is gekeken naar het gerealiseerde aanbodpatroon van de verkeers- en de vervoerdiensten. Dit geeft een beeld over het aantal verstoringen en de duur ervan.

In paragraaf 7.4 zijn scenario's gemaakt waarin de verschillende typen verstoringen vaker optreden dan normaal. Hiermee wordt inzicht verkregen in een eventuele toekomstsituatie waarin bepaalde verstoringen vaker optreden. Een gevoeligheidsanalyse met relevante parameters uit het model, is in de volgende paragraaf het onderwerp. Dit geeft een beeld over de invloed van parameters op het uiteindelijke resultaat.

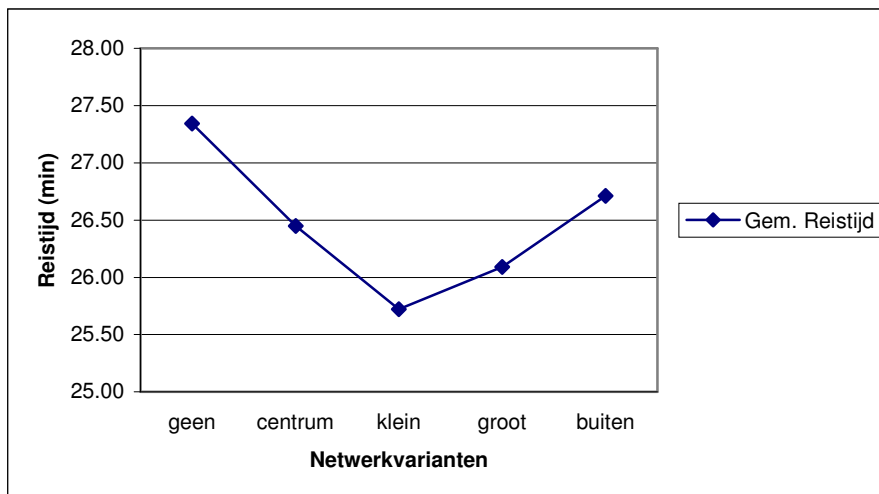
Paragraaf 7.6 geeft een overzicht van de invloed van de verstoringen in het infrastructuurnetwerk op de verschillende doelgroepen en de gedefinieerde criteria.

Discussie over gemaakte keuzes en aannames in het model volgt in paragraaf 7.7 evenals een reflectie op het gekozen model en een terugkoppeling van de resultaten naar het netwerkontwerp.

7.2 Uitkomsten onverstoorte situatie

In een dienstennetwerk zonder verstoringen kunnen alle reizigers de kortste route nemen tussen herkomst en bestemming. Dit is dus de ideaalsituatie voor zowel de netwerkplanner als de reiziger. In deze paragraaf wordt de onverstoorte situatie voor het gekozen netwerk weergegeven.

De gemiddelde reistijd per verplaatsing in het netwerk is 26,46 minuten (inclusief overstaptijd). Hoe groot de gemiddelde reistijd per netwerkvariant is, is te zien in figuur 7.1. Het dienstennetwerk met een kleine ringlijn heeft de beste verbindingen tussen de knopen in het netwerk met een gemiddelde reistijd van 25,7 minuten. De variant zonder ringlijn heeft de langste verbindingen met gemiddeld 27,3 minuten reistijd per verplaatsing. Dit is zeer logisch omdat bij deze variant alle verplaatsingen via de centrumknoop gemaakt moeten worden en dit vaak een omweg geeft. De reistijden in de onverstoorte situatie zijn voor het bus- en tramsysteem gelijk aangezien zij hetzelfde dienstennetwerk aanbieden.



Figuur 7.1 Gemiddelde reistijd per verplaatsing per variant

In tabel 7.1 staan het aantal voertuig- en verplaatsingskilometers in het netwerk. Tevens zijn deze verdisconteerd met de reiskosten, exploitatiekosten en totale kosten van het dienstennetwerk. Deze cijfers geven een beeld van de grootte van de verplaatsingen binnen de stad, zowel van de vervoerdiensten als van de reizigers en ze geven aan hoe de kosten verdeeld zijn per voertuig- of verplaatsingskilometer.

Het aantal voertuig- en verplaatsingskilometers is voor beide vervoerssystemen gelijk. Ze bieden beide dezelfde diensten aan tegen dezelfde vraag. De exploitatiekosten voor een tramdienst zijn groter dan voor een busdienst, dus ook de kosten per voertuigkm. Dit verschil komt ook terug in de totale kosten per voertuigkm. De reiskosten per verplaatsingskm zijn voor beide vervoerssystemen gelijk als gevolg van gelijke waardering van reistijd in beide systemen. De totale kosten per verplaatsingskm liggen uiteraard hoger voor een tramsysteem.

	Eenheid	Bus	Tram
Voertuigkm (mln.)	km	9.96	9.96
Expl.kosten / voertuigkm	€ / km	4.25	6.92
Totale kosten / voertuigkm	€ / km	17.20	20.25
Verplaatsingskm (mln.)	km	228.4	228.4
Reiskosten / verplaatsingskm	€ / km	0.46	0.46
Totale kosten / verplaatsingskm	€ / km	0.64	0.76

Tabel 7.1 Kosten per voertuig- en verplaatsingskilometers

Aandacht voor de totale kosten in de onverstoorde situatie volgt in paragraaf 7.4.3. Daar wordt hier verder niet op ingegaan.

7.3 Aanbodpatroon van infrastructuur en van vervoerdiensten

Voordat de effecten van de verstoringen op de kosten, robuustheid en betrouwbaarheid behandeld worden, kijken we eerst naar het gerealiseerde aanbod van infrastructuur en vervoerdiensten. Het gerealiseerde aanbod is als gevolg van verstoringen niet hetzelfde als het geplande aanbod.

Aanbod infrastructuur

Gemiddeld zijn er per jaar in het businfranetwerk 5,8 verstoringen per schakel en in een traminfranetwerk 3,5 verstoringen per schakel. Deze verstoringen leiden tot een gemiddelde uitval van 0,8 dag per schakel in het infrastructuurnetwerk van een bus en 0,6 dag per schakel in het infrastructuurnetwerk van een tram. Hierbij moet in ogenschouw genomen worden dat grote verstoringen met een tijdsduur van gemiddeld 2 weken de gemiddelde tijdsduur van de verstoringen flink opschroeven. (zorgt voor uitval van gemiddeld ongeveer 0,3 dag per schakel) Er zijn meer verstoringen in het infranetwerk van de bus omdat een bussysteem kwetsbaarder is voor ongevallen dan een tram vanwege het ontbreken van een vrije baan. In totaal is er in het businfranetwerk per jaar gemiddeld 54,8 dagen een verstoring aanwezig. Dit hoeft niet te betekenen dat er gedurende die tijd ook een schakel in het dienstennetwerk heeft gefaald, omdat er vaak een reparatienetwerk gemaakt kan worden.

In het traminfranetwerk treedt per jaar gemiddeld gedurende 38,8 dagen een verstoring op. De verdeling van de totale tijdsduur per type verstoring is in tabel 7.2 weergegeven.

Type verstoring	Tijdsduur (in dagen) verstoring bus	Tijdsduur (in dagen) verstoring tram
Kleine verstoring	27.90	17.26
Storm	0.22	0.10
IJzel	0.82	0.52
Sneeuw	0.05	0.13
Onweer	0.00	0.44
Grote verstoring	25.79	20.05
Totaal	54.77	38.78

Tabel 7.2 Som van alle verstoringsduren per type op jaarbasis

Aanbod vervoerdiensten

Het is lastiger om over het gerealiseerde aanbod van de tramvervoerdiensten iets te zeggen omdat de impact van een verstoring voor het dienstennetwerk afhankelijk is van de plaats van de verstoring en het actuele dienstennetwerk.

Bij de busvervoerdiensten ligt het eenvoudiger, daar leiden storm en sneeuw altijd tot uitval in het dienstennetwerk en de overige verstoringen leiden tot een reparatienetwerk. Dus gemiddeld 0,27 dag op jaarbasis vallen er schakels uit in het busnetwerk en gedurende 54,50 dagen is er een reparatienetwerk actief in het busdienstennet.

De tijd dat verplaatsingen niet gemaakt konden worden in het dienstennetwerk op jaarbasis is wel bekend. (alleen niet gemaakte verplaatsingen vanwege het afwezig zijn van een beschikbare route in het netwerk) Dit is een indicator voor het aanbod van de vervoerdiensten.

De tijd dat verplaatsingen gemiddelde niet gemaakt konden worden, is voor een busvervoerdienstennetwerk 1,54 *uur* en voor een tramnetwerk 1,62 *dag*. Dit is een groot verschil omdat bij een bussysteem aangenomen is dat er bij veel verstoringen een reparatienetwerk mogelijk is. Bij een tramsysteem leiden veel verstoringen tot uitval van schakels in het dienstennetwerk.

Het totaal aantal verplaatsingen dat binnen het dienstennetwerk van bus en tram gemaakt wordt, is 23,6 miljoen.

7.4 Resultaten van de analyse

In deze paragraaf zal op de onderzoeksvragen zoals die eerder geformuleerd zijn in paragraaf 3.5 een antwoord gegeven worden. Dit betreft de vragen 4-9 die pas na gedane simulatie beantwoord konden worden.

Onderzoeksvragen:

- 4 Wat is het meest robuuste netwerk, dus het netwerk met de minste niet gemaakte verplaatsingen?
- 5 Wat is het meest betrouwbare netwerk? Bij welk netwerk varieert bijvoorbeeld de reistijd het minst?
- 6 Hoe is de verdeling van de totale kosten naar reiskosten, exploitatiekosten en kosten voor niet gemaakte verplaatsingen (zowel in de onverstoorde als verstoorde situatie)
- 7 Wat is het netwerk met de minimale totale kosten (optimum voor de overheid), minimale reiskosten (optimum gebruiker) en minimale exploitatiekosten (optimum exploitant)?
- 8 Is op basis van kosten, robuustheid en betrouwbaarheid een netwerk aan te wijzen die het beste is?
- 9 Hebben verstoringen in de beschikbaarheid van infrastructuur een verschillend effect op het dienstennetwerk van rail- en wegvervoer door een verschil in flexibiliteit dat bestaat tussen beide vervoertechnieken?

Toelichting vooraf bij de analyse:

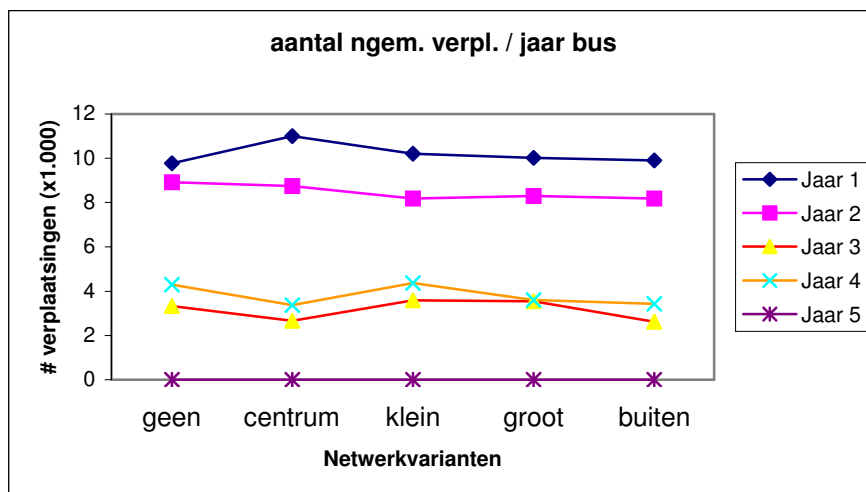
- ♣ De resultaten zijn gemiddelde waarden over een simulatie van 5 jaar
- ♣ De extra exploitatiekosten komen nergens terug omdat ze verwaarloosbaar klein zijn. (maximaal in de orde grootte van enkele tienduizenden euro's)
- ♣ De dienstennetwerkvarianten worden als volgt onderscheiden:
 - 1 Variant zonder ringlijn
 - 2 Variant met een centrumringlijn
 - 3 Variant met een kleine ringlijn
 - 4 Variant met een grote ringlijn
 - 5 Variant met een buitenringlijn

7.4.1 Wat is de meest robuuste variant, dus de netwerkvariant met de minste niet gemaakte verplaatsingen?

Voor de robuustheid van een dienstennetwerkvariant is louter gekeken naar de verplaatsingen die uitvallen vanwege het feit dat er geen route mogelijk is binnen het dienstennetwerk van herkomst naar bestemming en dus *niet* naar de verplaatsingen die uitvallen vanwege een te grote omrijroute. Het aantal niet gemaakte verplaatsingen is per jaar geanalyseerd omdat er vanwege het diffuse patroon in verstoringen verschillen per jaar optreden.

Robuustheid van het bussysteem

Het aantal niet gemaakte verplaatsingen is vrij constant over de varianten heen. (figuur 7.2) Dit is logisch voor een bussysteem omdat er bij de meeste typen verstoringen een reparatienetwerk gemaakt wordt waarbij de dienstuitvoering gehandhaaft blijft. Bij slechts twee typen verstoringen (sneeuw en storm) vallen er schakels uit in het dienstennetwerk die leiden tot niet gemaakte verplaatsingen. In het 5^{de} jaar was het aantal niet gemaakte verplaatsingen nul. Die lijn valt samen met de x-as. Het maximum aantal niet gemaakte verplaatsingen dat voorkomt, 11.000, is 0,47 ‰ van het totaal aantal verplaatsingen op jaarbasis in het OV-dienstennetwerk. Dit aantal is zeer weinig omdat deze 11.000 verplaatsingen ook nog eens niet in één tijdsperiode geen beschikbare route hebben, maar verdeeld zijn over een aantal periodes dat er een verstoring optrad die tot uitval leidde.

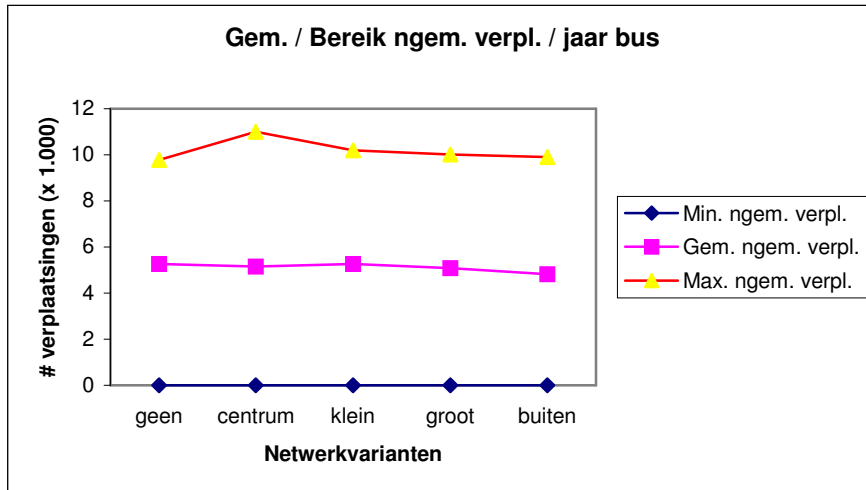


Figuur 7.2 Aantal niet gemaakte verplaatsingen / jaar in een bussysteem

In de navolgende figuur (figuur 7.3) zijn over de 5 gesimuleerde jaren het maximum, minimum en gemiddelde aantal niet gemaakte verplaatsingen bepaald.

Het minimum aantal niet gemaakte verplaatsingen valt samen met de x-as. Het gemiddelde aantal niet gemaakte verplaatsingen daalt vanaf de variant met een kleine ring zeer licht over de varianten heen naar de buitenring. De variant zonder ringlijn en de variant met een kleine ring kennen het hoogste aantal niet gemaakte verplaatsingen. Voor een busdienstennetwerk is variant 5 het meest robuust. (gemiddeld 4.800 ngem. verpl.) Daarna volgen variant 4 en 2. (gemiddeld 5.100 en 5.150 ngem. verpl.)

Het gemiddelde aantal niet gemaakte verplaatsingen in een bussysteem is 0,22 ‰ van het totaal aantal verplaatsingen.

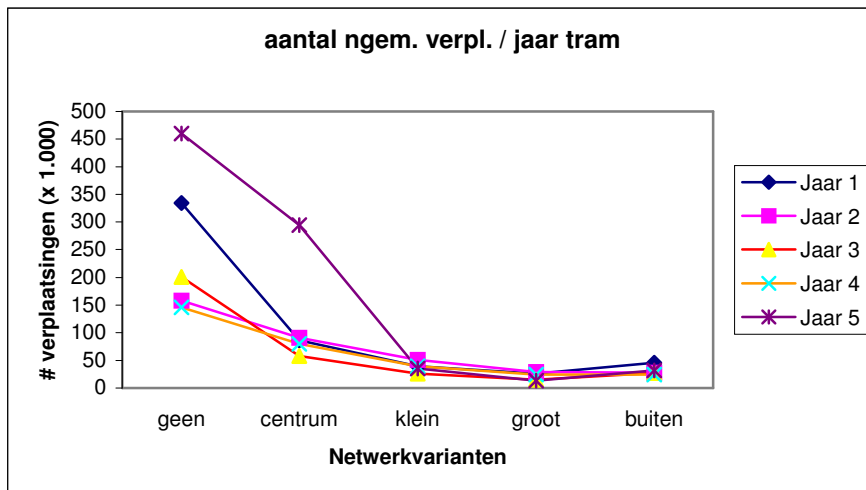


Figuur 7.3 Gemiddelde en bereik van het aantal niet gemaakte verplaatsingen / jaar in een bussysteem

Robuustheid van het tramsysteem

Voor een tramsysteem is eveneens het aantal niet gemaakte verplaatsingen bepaald om de robuustheid van de dienstennetwerken te analyseren. (figuur 7.4)

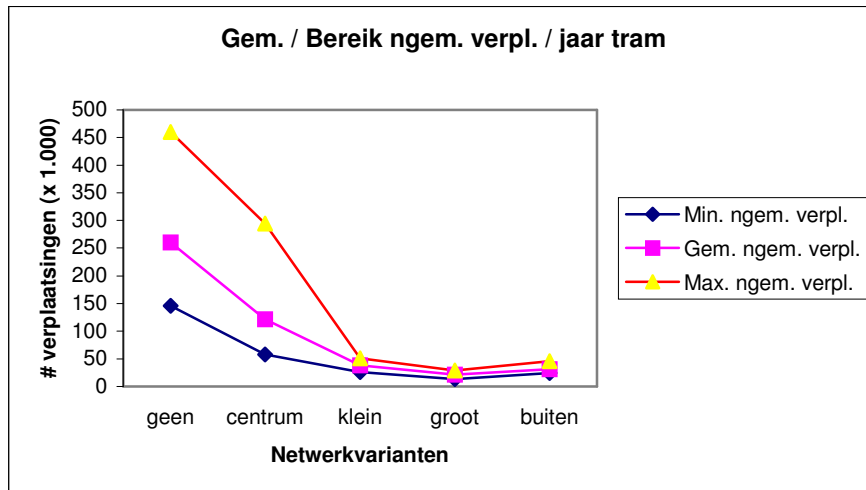
Bij variant 1 fluctueert het aantal niet gemaakte verplaatsingen nogal. In één van de vijf jaren (jaar 5) is het aantal bij de centrumringlijn fors hoger dan in de andere vier jaren. In dat jaar is er misschien precies een belangrijke schakel in het centrum uitgevallen door een verstoring. De varianten met een kleine, grote en buitenringlijn hebben een relatief gelijk aantal niet gemaakte verplaatsingen. Het is logisch dat bij de variant zonder een ringlijn er meer niet gemaakte verplaatsingen zijn dan bij de overige varianten vanwege het ontbreken van alternatieve routes.



Figuur 7.4 Aantal niet gemaakte verplaatsingen / jaar in een tramsysteem

Het maximum aantal niet gemaakte verplaatsingen bij variant 1 en 2 is respectievelijk 19 en 12 % van het totaal aantal verplaatsingen. (zie figuur 7.5) Dan is sprake van een grote uitval van het systeem, want 19 % aan verplaatsingen komt neer op in totaal bijna 7 dagen op jaarbasis dat er geen verplaatsingen mogelijk zijn tussen bepaalde herkomsten en bestemmingen. De varianten met een kleine, grote en buitenring liggen qua uitkomsten dicht bij elkaar. Aantal ngem. verplaatsingen bij deze drie varianten gemiddeld 1,3 % van het totaal.

De variant met een grote ringlijn is de meest robuuste variant bij een tramsysteem. (gemiddeld 21.500 ngem. verpl.) Na variant 4 volgen variant 5 en 3 met respectievelijk gemiddeld 31.500 en 38.500 niet gemaakte verplaatsingen.



Figuur 7.5 Gemiddelde en bereik van het aantal niet gemaakte verplaatsingen / jaar in een tramsysteem

Wat opvalt is het grote verschil in niet gemaakte verplaatsingen tussen weg- en railvervoer. Waar bij een bussysteem het maximale aantal ngem. verplaatsingen nog 0,47 % van het totale aantal verplaatsingen bedroeg, is dat bij een tramsysteem opgelopen tot 19 %. Bij het wegvervoer is de netdichtheid veel groter dan voor railvervoer. Dit maakt het wegvervoer flexibeler in gebruik waardoor er minder snel een schakel in het dienstennetwerk uitvalt. Het verschil in netdichtheid is terug te zien in het verschil in aantal niet gemaakte verplaatsingen voor beide vervoertechnieken.

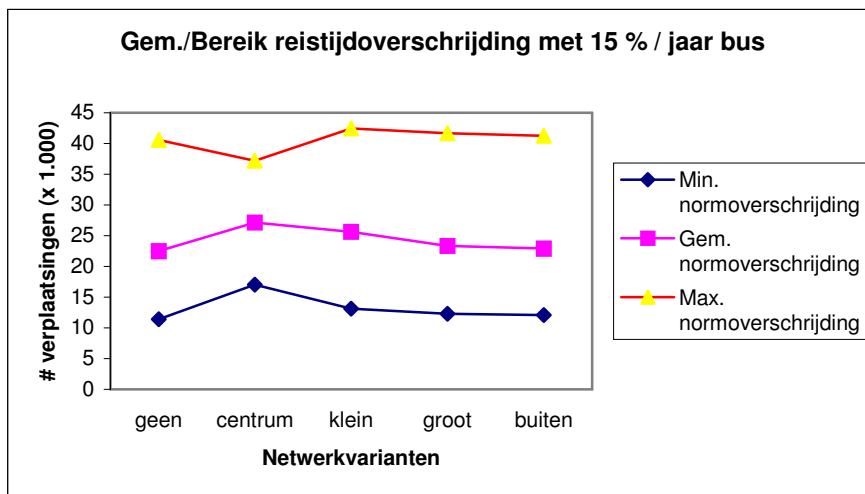
7.4.2 Wat is de meest betrouwbare variant? Bij welke variant varieert de reistijd het minst en welke variant heeft het kleinste reistijdverlies?

De reistijdbetrouwbaarheid van een dienstennetwerk wordt in dit onderzoek geanalyseerd aan de hand van twee indicatoren. (zie par. 2.6.2). Allereerst het aantal verplaatsingen dat een reistijd kent die groter is dan een bepaalde norm. Die norm is vastgesteld op 15 % van de onverstoorde reistijd. En de tweede indicator is het reistijdverlies. Dat is de totale reistijd die langer is dan de reistijd in de situatie zonder verstoringen.

Normoverschrijding reistijd bus

In de figuur hieronder (figuur 7.6) is het gemiddelde aantal en het bereik van het aantal overschrijdingen van de 15 %-norm van de reistijd over de jaren heen weergegeven. Er is weinig variatie in het gemiddelde aantal verplaatsingen waarbij de reistijd over de norm heen ging. Variant 2 heeft een wat hoger gemiddelde dan de rest. Het maximum aantal verplaatsingen is bij de variant met de kleine ringlijn het hoogst met 42.500 verplaatsingen, dit is 1,8 % van het totaal verplaatsingen.

De variant zonder ringlijn blijkt de meest betrouwbare variant te zijn met 9,5 % van de verplaatsingen (22.500) die een reistijd kenden groter dan de vastgestelde norm. Hierna volgen de variant met de buitenringlijn en de grote ringlijn. (23.000 en 23.500 verplaatsingen) De verschillen tussen de varianten zijn zeer klein. Dit was ook niet te verwachten omdat bij de meeste typen verstoringen een reparatienetwerk wordt gemaakt met een vooraf gedefinieerde omrijroute die altijd even lang is. Hierdoor is de netwerkvorm van minder groot belang geworden.



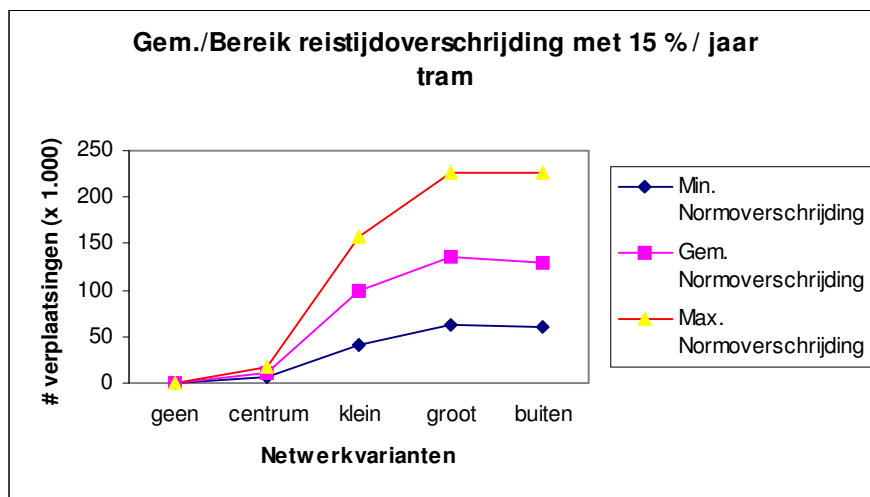
Figuur 7.6 Gemiddelde en bereik van aantal verplaatsingen in bussysteem dat reistijd boven de norm heeft

Normoverschrijding reistijd tram

Bij een tramsysteem is het aantal maal dat de reistijd van een verplaatsing de norm overschreed bij de varianten met een kleine, grote en buitenringlijn fors hoger dan bij de varianten zonder ringlijn en met een centrumring. (figuur 7.7) Bij die laatste twee netwerkvarianten is de omrijroute minder groot (bij variant 1 is een omrijroute zelfs niet aanwezig, dus een normoverschrijding van nul) doordat een alternatieve route in het bestaande dienstennetwerk gevonden moet worden en blijft de reistijd vaak onder de acceptabele reistijd.

Het maximum aantal verplaatsingen met een reistijd groter dan de norm van 15 % is te vinden bij de variant met de buitenringlijn en bedraagt 227.000, dit is 9,6 % van het totale aantal verplaatsingen.

De variant zonder ringlijn is de meest betrouwbare variant. Dat is logisch omdat daar geen omrijroutes beschikbaar zijn. Na deze variant volgen de variant met een centrumringlijn en een kleine ringlijn met gemiddeld 10.000 en 100.000 verplaatsingen die een reistijd boven de vastgestelde norm kenden.



Figuur 7.7 Gemiddelde en bereik van aantal verplaatsingen in tramsysteem dat reistijd boven de norm heeft

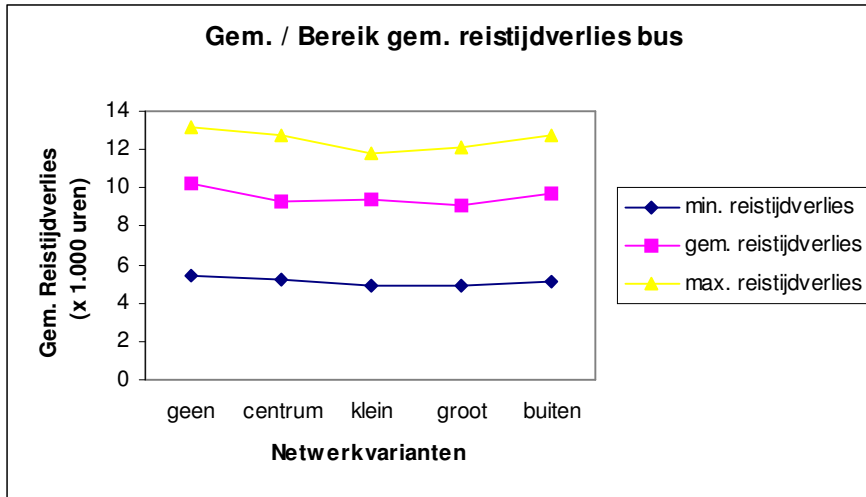
Bij een tramsysteem is het veel eenduidiger dan bij een bussysteem welke varianten een goede betrouwbaarheid op basis van normoverschrijding van de reistijd hebben en welke varianten niet. Dit heeft dus alles te maken met de dichtheid van het infrastructuurnetwerk. Voor wegvervoer is deze groot en voor railvervoer niet. Bij railvervoer zorgt dit dus sneller voor grotere omwegen en dus voor meer overschrijdingen van de norm van 15 % extra reistijd.

Reistijdverlies bussysteem

De tweede indicator van de betrouwbaarheid van het netwerk naast de norm voor een acceptabele reistijd is het reistijdverlies. Het reistijdverlies is het verschil in reistijd tussen de onverstoorde reistijd en de gerealiseerde reistijd van een verplaatsing.

Het reistijdverlies is weergegeven in uren. Voor een bussysteem zijn de verschillen in reistijdverlies tussen de netwerkvarianten zeer klein. (figuur 7.8) Het reistijdverlies ligt voor alle varianten tussen de 9.000 en 10.000 uur. Op 23,6 mln. verplaatsingen op jaarbasis is dit reistijdverlies niet groot. In het gekozen busdienstennetwerk zijn de meeste omrijroutes kort. (3 minuten), dus geeft dit in totaal ook een klein reistijdverlies. De netwerkform geeft weinig verschil te zien in betrouwbaarheid op basis van het reistijdverlies.

Het maximale reistijdverlies komt voor bij de variant zonder ringlijn en bedraagt 13.000 uur. De meest betrouwbare variant op basis van het criterium van reistijdverlies is variant 4 met een gemiddeld reistijdverlies van 9.000 uur. Hierna komen de varianten met een centrumringlijn en een kleine ringlijn met beide afgerond een reistijdverlies van 9.500 uur.

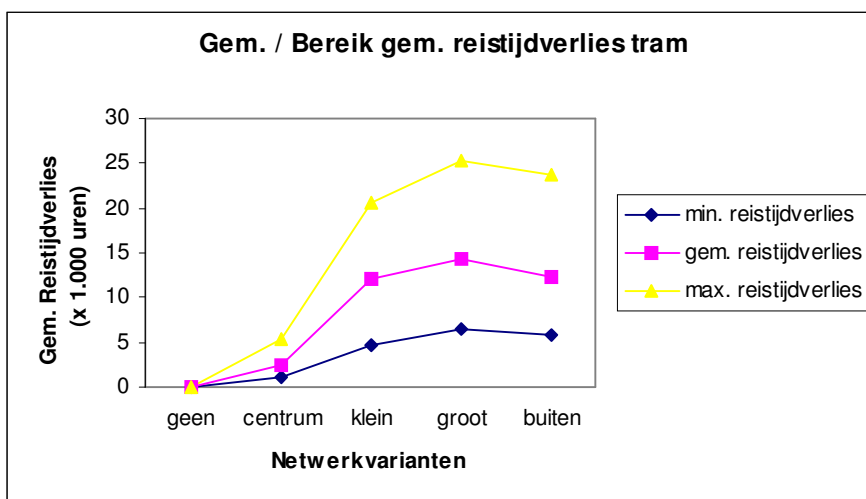


Figuur 7.8 Gemiddelde en bereik van het gemiddelde reistijdverlies in een bussysteem

Reistijdverlies tramsysteem

Het verloop van het minimum, het gemiddelde en het maximum reistijdverlies is gelijk. Met toenemende lengte van omrijroutes neemt ook het reistijdverlies toe. (zie figuur 7.9) De variant zonder ringlijn heeft altijd een reistijdverlies van nul. (geen omrijroutes mogelijk) Deze variant is dus automatisch de meest betrouwbare variant op basis van het criterium van reistijdverlies. Na variant 1 volgen de varianten met een centrumring en een kleine ringlijn met respectievelijk een reistijdverlies van 2.500 en 12.000 uur.

De variant met een grote ringlijn heeft het grootste reistijdverlies en niet zoals misschien verwacht, de netwerkvariant met de buitenringlijn. Dit is een gevolg van het aantal bereikbare knopen in de reparatienetwerken die gemaakt worden. Bij de buitenringlijn heeft het reparatienetwerk slechts effect voor de bereikbaarheid van de laatste knoop op een radiaallijn. Bij een grote ringlijn stijgt de bereikbaarheid van de voorlaatste knoop van een radiaallijn ook. Met een toenemende bereikbaarheid op de lijn waar een verstoring is, neemt ook het aantal verplaatsingen toe dat een omrit maakt en dus het reistijdverlies.



Figuur 7.9 Gemiddelde en bereik van het gemiddelde reistijdverlies in een tramsysteem

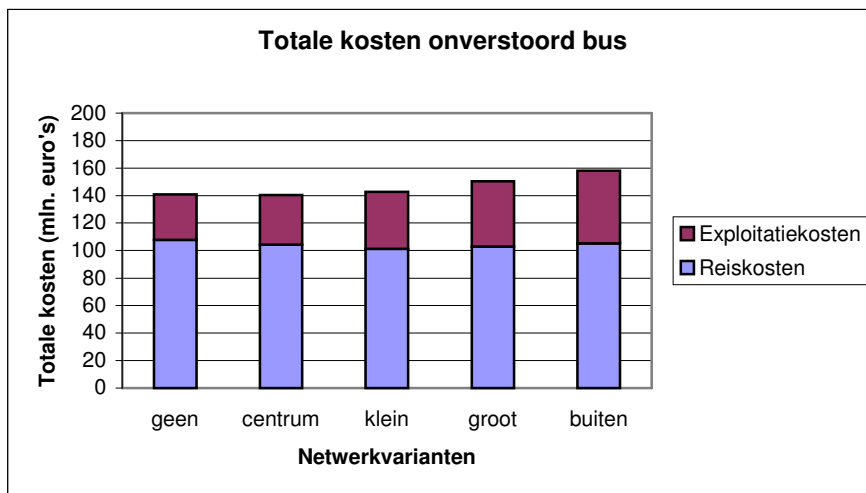
7.4.3 Hoe is de verdeling van de totale kosten naar reiskosten, exploitatiekosten en kosten voor niet gemaakte verplaatsingen? (zowel in de onverstoorde als verstoorde situatie)

De beantwoording van deze vraag geeft inzicht in de grootte van de verschillende kostencomponenten en of de verhoudingen tussen die componenten veranderen als gevolg van verstoringen in de beschikbaarheid van infrastructuur.

Totale kosten bussysteem

In de situatie zonder verstoringen bestaan de totale kosten alleen uit exploitatiekosten en reiskosten. De reiskosten zijn het leeuwendeel van de totale kosten. (figuur 7.10) De verhouding tussen reiskosten en exploitatiekosten bij de variant zonder ringlijn is ongeveer 3:1 en bij de variant met een buitenringlijn ongeveer 2:1.

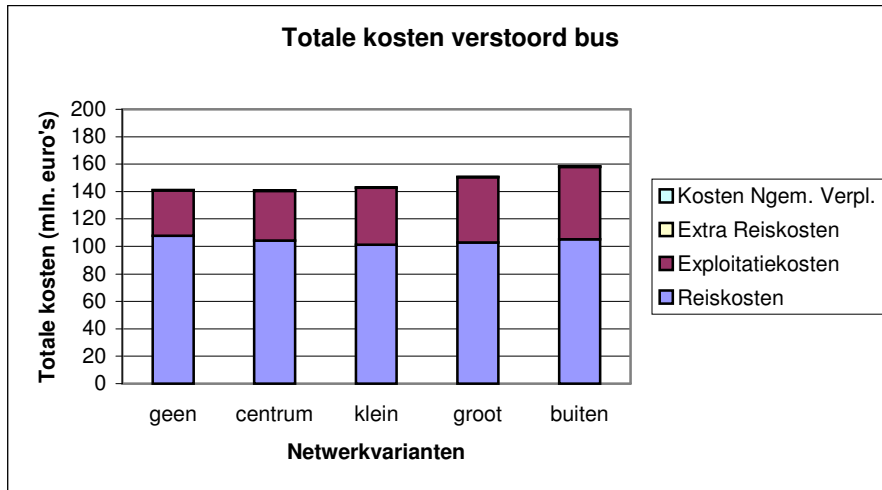
Variant 2 heeft de minimale totale kosten. Dit is het *optimum* voor de *overheid* in de *onverstoorde* situatie. Het verschil met de variant zonder ringlijn is klein, 140,4 om 140,8 mln. euro. Na deze twee netwerkvarianten is de netwerkvariant met een kleine ringlijn de goedkoopste met 142,8 mln. euro.



Figuur 7.10 Uitsplitsing totale kosten bus in de onverstoorde situatie

In de *verstoorde* situatie zijn er naast exploitatiekosten en reiskosten nu ook extra reiskosten en kosten voor niet gemaakte verplaatsingen (zowel door verplaatsingen zonder route als door verplaatsingen met een te lange omrijroute). Zoals te zien is in figuur 7.11 zijn de extra reiskosten en de kosten voor niet gemaakte verplaatsingen zeer klein. De extra reiskosten bedragen gemiddeld 0,19 mln. euro en de kosten voor niet gemaakte verplaatsingen gemiddeld 0,18 mln. euro.

De variant met een centrumringlijn blijft de variant met de minste totale kosten. (140,8 mln. euro) De variant zonder ringlijn en de variant met een kleine ringlijn volgen hierna. (141,2 en 143,1 mln. euro) De varianten met een grote en een buitenringlijn scoren beduidend slechter qua totale kosten dan variant 1,2 en 3.

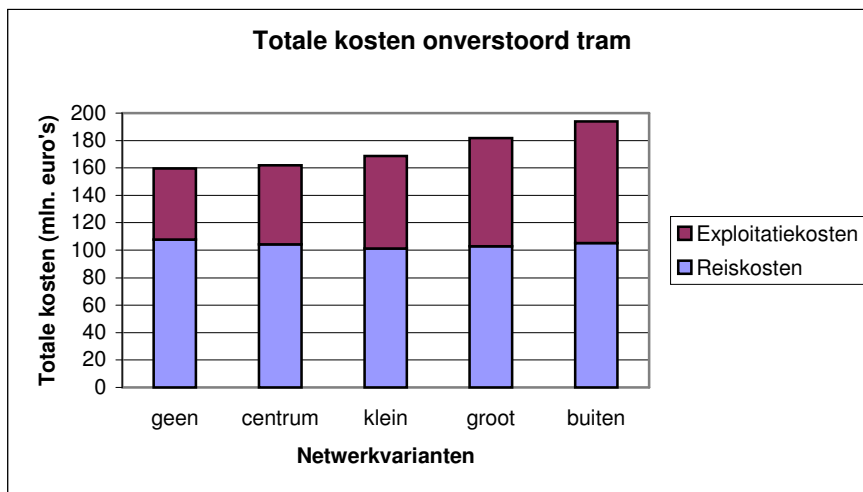


Figuur 7.11 Uitsplitsing totale kosten bus in de verstoorde situatie

Totale kosten tramsysteem

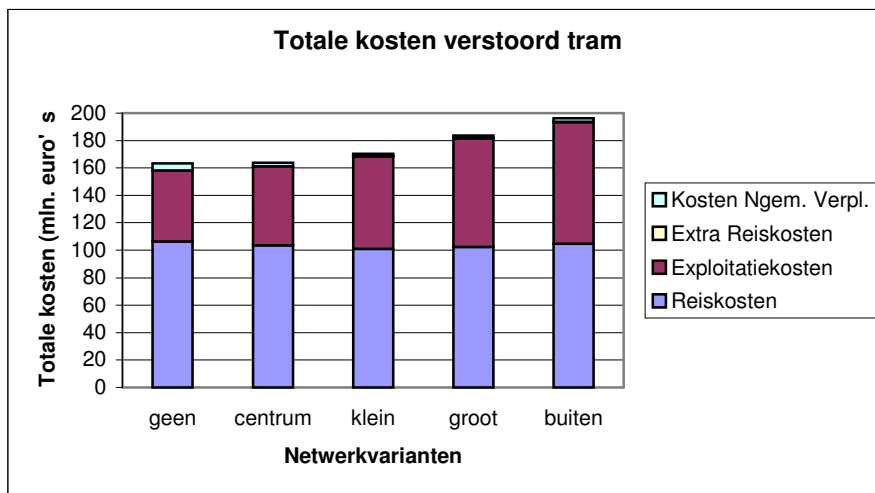
Bij een tramsysteem maken de exploitatiekosten een groter deel uit van de totale kosten dan bij een bussysteem. (figuur 7.12) De verhouding tussen reiskosten en exploitatiekosten bij de variant zonder ringlijn is ongeveer 2:1 en bij de variant met een buitenring 1:1.

Variant 1 is het optimum voor de overheid in de onverstoorde situatie. Die heeft de laagste totale kosten. (159,5 mln. euro) Per variant van de centrumring tot de buitenring lopen de totale kosten op. Dit is vooral een gevolg van de stijgende exploitatiekosten.



Figuur 7.12 Uitsplitsing totale kosten tram in de onverstoorde situatie

In de situatie waarin verstoringen optreden zijn de extra reiskosten net als bij een bussysteem een bescheiden deel van de totale kosten, gemiddeld 0,16 mln. euro. De kosten voor niet gemaakte verplaatsingen zijn echter wel terug te zien in figuur 7.13. Zeker bij de variant zonder ringlijn en bij een centrum- en een buitenring. Voor variant 1 en 2 geldt dat er weinig of geen alternatieve routes voor de tram zijn en bij de variant met een buitenringlijn zijn er vooral veel verplaatsingen die niet gemaakt kunnen worden vanwege een te lange omweg. De variant zonder ringlijn is de beste variant qua totale kosten. Het verschil met de variant met een centrumring is klein: 0,3 mln. euro. (163,4 om 163,7 mln. euro) De overige varianten hebben hogere totale kosten.



Figuur 7.13 Uitsplitsing totale kosten tram in de verstoorde situatie

De totale kosten zijn voor een tramsysteem gemiddeld 30 mln. euro hoger dan voor een bussysteem. Dit verschil wordt bepaald door de exploitatie- en investeringskosten. Die zijn voor railvervoer hoger dan voor wegvervoer. Bij beide vervoertechnieken zijn de extra reiskosten klein. Kosten voor niet gemaakte verplaatsingen spelen alleen bij een tramsysteem een rol in de totale kosten.

7.4.4 Wat is de variant met de minimale totale kosten (optimum voor de overheid), minimale reiskosten (optimum gebruiker) en minimale exploitatiekosten (optimum exploitant)?

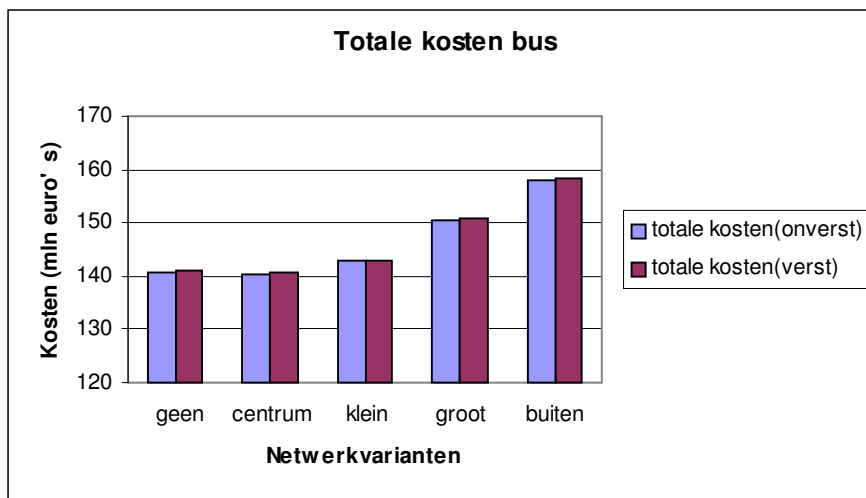
Alle betrokken partijen bij het netwerkontwerpprobleem proberen hun eigen kosten te minimaliseren. Voor de overheid zijn dat de totale kosten, voor de gebruiker de reiskosten en voor de exploitant de exploitatiekosten. Achtereenvolgens zullen de kosten voor deze partijen geanalyseerd worden en kan het optimum worden bepaald.

Optimum voor de overheid

In de voorgaande onderzoeksvraag is duidelijk geworden dat het minimum voor de totale kosten bij een bussysteem ligt bij de variant met een centrumringlijn en voor een tramsysteem bij de variant zonder ringlijn. Om de verschillen tussen de onverstoorde en de verstoorde situatie beter te kunnen zien, is in figuur 7.14 en 7.15 alleen het bovenste gedeelte van de kostenkolom weergegeven.

Figuur 7.14 geeft de totale kosten voor een bussysteem weer in de situatie *zonder* en *met* verstoringen in de dienstuitvoering.

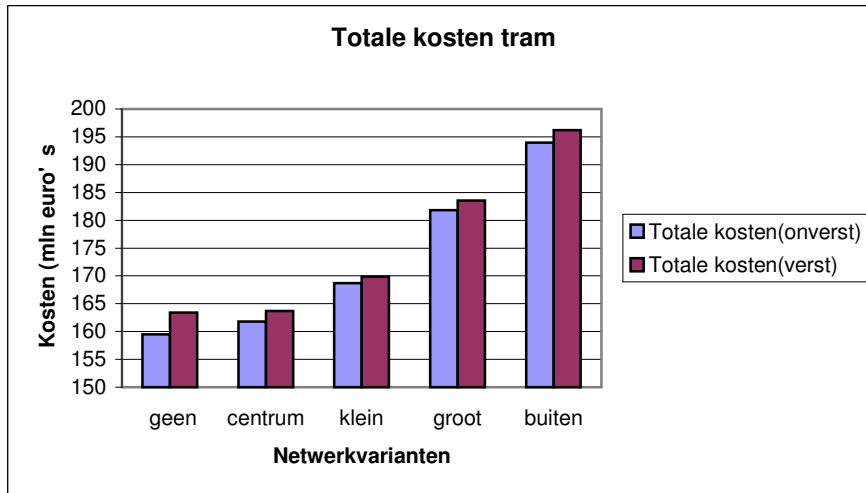
De totale kosten van een busnetwerk stijgen zeer licht als gevolg van de optredende verstoringen. De gemiddelde stijging bedraagt 2,3 % en de maximale stijging 2,5 % (dit is bij de variant zonder ringlijn). Dat betekent dat verstoringen in de beschikbaarheid van infrastructuur nauwelijks effect hebben op de totale kosten van een bussysteem.



Figuur 7.14 Verschil onverstoorde-verstoorde situatie bus qua totale kosten

De totale kosten bij een tramsysteem stijgen met gemiddeld 13 % door de verstoringen in de dienstuitvoering. (figuur 7.15) De maximale stijging van de kosten is bij variant 1 (3,9 mln. euro) en deze bedraagt 24 %. Dit is geen kleine toename van de kosten. De maximale stijging van de kosten is bijvoorbeeld 10 keer zo groot als bij een bussysteem. Bij de variant met een kleine ringlijn stijgen de totale kosten het minst, met 1,2 mln. euro.

Duidelijk is dat bij een tramsysteem de verstoringen in de beschikbaarheid van infrastructuur effect hebben op de totale kosten. De optimale variant blijft nog steeds dezelfde en dat is de variant zonder ringlijn.



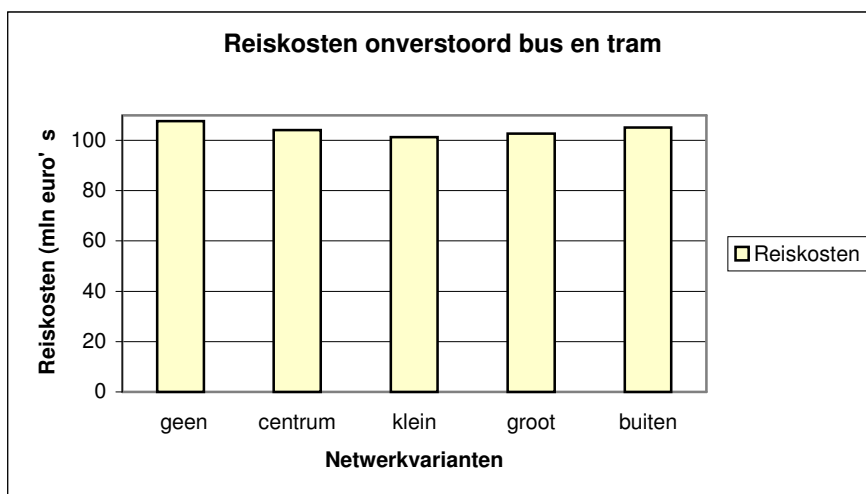
Figuur 7.15 Verschil onverstoorde-verstoorde situatie tram qua totale kosten

De verstoringen in de dienstuitvoering hebben voor een bussysteem nauwelijks effect op de totale kosten, maar bij een tramsysteem wel degelijk. Voor zowel weg- als railvervoer verandert de optimale variant echter niet als gevolg van de verstoringen.

Optimum voor de gebruiker

De reiskosten in de onverstoorde situatie zijn voor een bus- en een tramsysteem gelijk, want ze bieden beide exact hetzelfde dienstennetwerk aan en hebben hetzelfde vraagpatroon in de onverstoorde situatie. Slechts de vervoertechniek waarmee het dienstennetwerk wordt aangeboden, is anders.

Voor de reiziger is de variant met een kleine ringlijn de beste variant in de onverstoorde situatie. (figuur 7.16) Hierbij zijn de gemiddelde reistijd voor een verplaatsing en dus ook de totale reiskosten het laagst. (101,3 mln. euro) Hierna volgen de variant met een grote ringlijn en de variant met een centrumring, respectievelijk met 102,7 en 104,1 mln. euro.



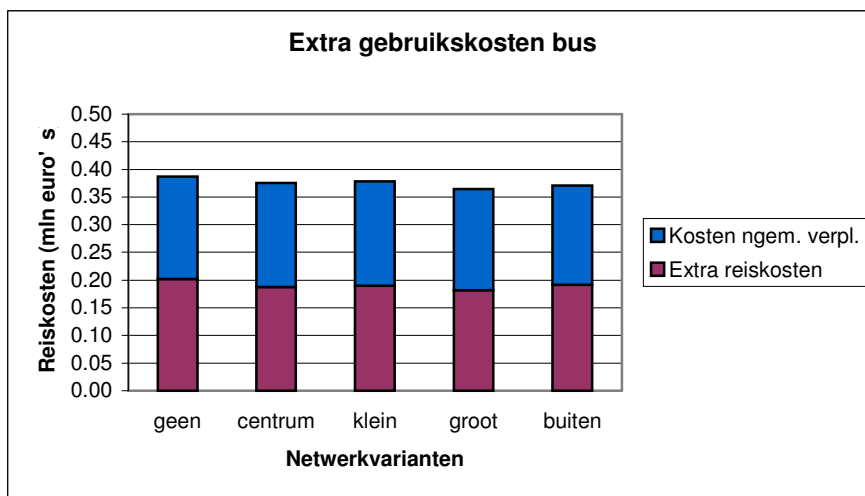
Figuur 7.16 Reiskosten onverstoorde situatie bus en tram

Om een beeld te krijgen van de extra kosten voor de reiziger als gevolg van verstoringen in een bussysteem zijn alleen de extra reiskosten en de kosten voor niet gemaakte verplaatsingen weergegeven. Ten opzichte van de normale reiskosten zijn deze kosten namelijk zeer klein. (zie figuur 7.17)

De extra reiskosten zijn bij alle varianten ongeveer even groot, gemiddeld 0,19 mln. euro. Ook de kosten voor niet gemaakte verplaatsingen variëren niet sterk, deze zijn gemiddeld 0,18 mln. euro groot. Deze twee kostencomponenten geven een totale toename in de totale reiskosten met gemiddeld 3,5 %)

De geringe variatie in reiskosten komt doordat de beschikbare infrastructuur voor een reparatienetwerk bij elke variant gelijk is. Ook de plaats en duur van de verstoringen zijn voor elke variant gelijk. De enige variatie komt door het feit dat niet bij elke variant alle verstoringen meedoen.

De variant met een kleine ringlijn heeft in de verstoorde situatie nog steeds minimale kosten. (rangorde van de onverstoorde situatie is door gelijke toename van de kosten niet veranderd)



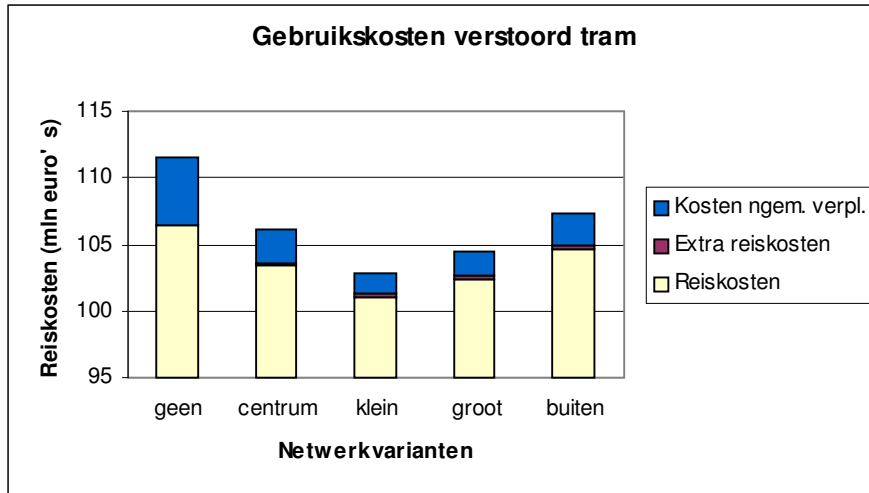
Figuur 7.17 Extra gebruikskosten voor een bussysteem

In een tramsysteem zijn de extra reiskosten in de verstoorde situatie bij de variant zonder ringlijn altijd nul omdat er geen reparatienetwerk mogelijk is. De kosten voor niet gemaakte verplaatsingen zijn echter bij de variant zonder ringlijn het grootst: 5,2 mln. euro. (figuur 7.18) Dit is tegelijkertijd de maximale stijging van de kosten voor de gebruiker, namelijk 4,9 % van de reiskosten.

Bij de varianten met een centrumringlijn en de kleine ring dalen de kosten voor niet gemaakte verplaatsingen om bij de varianten met een grote ring en een buitenring weer te stijgen. Deze stijging wordt veroorzaakt door uitval van verplaatsingen als gevolg van een te grote omrijroute.

Bij variant 4 zijn de extra reiskosten maximaal: 0,29 mln. euro.

De varianten met een kleine ring, grote ring en een centrumringlijn scoren respectievelijk het beste voor de gebruiker van het dienstennetwerk. De totale kosten voor de gebruiker zijn dan: 102,8; 104,5 en 106,1 mln. euro.

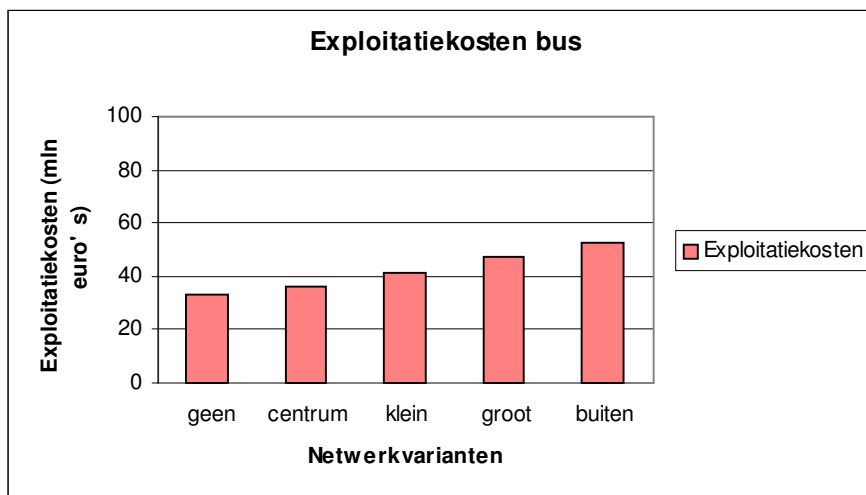


Figuur 7.18 Extra kosten voor de gebruiker als gevolg van verstoringen tramsysteem

Optimum voor de exploitant

De exploitant streeft naar minimale exploitatiekosten om zijn opbrengsten zo hoog mogelijk te maken. In figuur 7.19 zijn de exploitatiekosten voor een bussysteem weergegeven. Dit zijn zowel de exploitatiekosten in de onverstoorde als in de verstoorde situatie. Het komt namelijk zelden voor in de analyse dat er extra bussen moeten worden ingezet, omdat de omweg bij een bussysteem meestal niet zo groot is, vanwege de vele beschikbare infrastructuur. De extra exploitatiekosten bij een bussysteem zijn dus verwaarloosbaar.

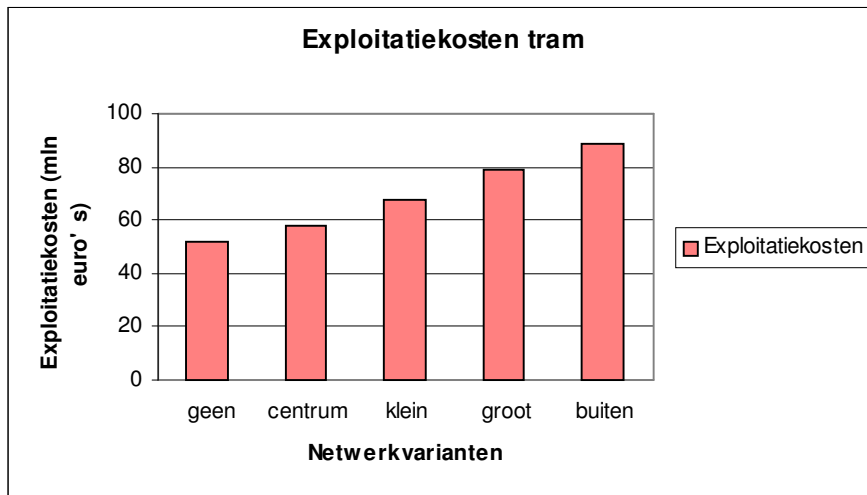
De variant zonder ringlijn is logischerwijs de meest optimale variant voor de exploitant. De overige varianten worden met toenemende lengte van de ringlijnen steeds duurder. De frequentie op alle ringlijnen is gelijk, dus de voertuiginzet wordt steeds groter.



Figuur 7.19 Exploitatiekosten bussysteem

In een tramsysteem blijken de extra exploitatiekosten niet veel groter te zijn dan enkele tienduizenden euro's. Deze kostencomponent is, net als bij een bussysteem, buiten beschouwing gelaten in het onderzoek.

Het verloop van de exploitatiekosten is hetzelfde als bij een bussysteem alleen zijn de exploitatiekosten nu hoger omdat exploitatie van een tramsysteem sowieso duurder is dan van een bussysteem en omdat de investeringskosten voor traminfrastructuur verdisconteerd zijn in de exploitatiekosten. De exploitatiekosten zijn weergegeven in figuur 7.20



Figuur 7.20 Exploitatiekosten tramsysteem

In onderstaande tabellen (7.3 en 7.4) is voor beide vervoertechnieken een overzicht gegeven van de scores van de netwerkvarianten per doelgroep:

Doelgroep	Beste variant		BUS		Slechtste variant
Overheid	2	1	3	4	5
Gebruiker	3	4	2	5	1
Exploitant	1	2	3	4	5

Tabel 7.3 Rangschikking varianten per doelgroep bij een bussysteem

Doelgroep	Beste variant		TRAM		Slechtste variant
Overheid	1	2	3	4	5
Gebruiker	3	4	2	5	1
Exploitant	1	2	3	4	5

Tabel 7.4 Rangschikking varianten per doelgroep bij een tramsysteem

Uit deze rangschikking komen duidelijk de verschillende belangen per partij, die betrokken zijn bij het netwerkontwerpprobleem, naar voren.

7.4.5 Is op basis van kosten, robuustheid en betrouwbaarheid een variant aan te wijzen die het beste is?

Het is nu bekend welke varianten goed en slecht scoren op de drie gestelde criteria: kosten, robuustheid en betrouwbaarheid. Hiermee kan een antwoord gegeven worden op de vraag of rekening houden met robuustheid en betrouwbaarheid andere netwerkontwerpen oplevert dan puur rekenen met kosten. De kosten zijn hier bekeken vanuit het punt van de overheid (totale kosten) waarbij zowel de kosten voor de gebruiker als de exploitant zijn meegenomen. In onderstaande tabellen (7.5 en 7.6) is voor een bus- en een tramsysteem een overzicht weergegeven:

Criterium	Beste variant		BUS		Slechtste variant
Kosten	2	1	3	4	5
Robuustheid	5	4	3	2	1
Betrouwbaarheid					
Normoverschr.	1	5	4	3	2
Reistijdverlies	4	2	3	5	1

Tabel 7.5 Scores varianten per criterium voor een bussysteem

Criterium	Beste variant		TRAM		Slechtste variant
Kosten	1	2	3	4	5
Robuustheid	4	5	3	2	1
Betrouwbaarheid					
Normoverschr.	1	2	3	5	4
Reistijdverlies	1	2	3	4	5

Tabel 7.6 Scores varianten per criterium voor een tramsysteem

Uit deze scores blijkt dat er niet eenduidig een variant aan te wijzen is die het beste is op alle criteria. Dit is ook bijna onmogelijk daar sommige criteria bijna het tegenovergestelde lijken te bewerkstelligen. Deze uitkomsten geven wel aan dat het zinvol kan zijn om naast de totale kosten te minimaliseren, rekening te houden met robuustheid en betrouwbaarheid als (extra) criterium daar dat toch andere netwerkvormen als uitkomst geeft.

Om de criteria tegen elkaar af te wegen, is een multi-criteria-analyse toegepast. De beste variant per criterium krijgt 5 punten, de daarna volgende 4 etc. en de slechtste variant op een criterium scoort 1 punt. Voor de MCA zijn gewichten nodig omdat betrouwbaarheid uiteengevallen is in twee delen. Beide delen krijgen een gewicht van 1 en robuustheid en kosten krijgen een gewicht van 2. Op deze manier worden kosten, robuustheid en betrouwbaarheid gelijk gewaardeerd.

Dit geeft de volgende resultaten voor een bus- en een tramsysteem:

Bussysteem	
Variant	Score
4	20
2	19
5	18
3	17
1	16

Tabel 7.7 Totaalscores netwerkvarianten bus

Tramsysteem	
Variant	Score
1	22
2	20
3	18
4	17
5	13

Tabel 7.8 Totaalscores netwerkvarianten tram

Bij een bussysteem blijken de verschillen tussen de varianten zeer klein te zijn. Uiteindelijk scoort variant 4, met een grote ringlijn, het beste vanwege zijn goede robuustheid en kleine reistijdverlies. Variant 2 is tweede vanwege zijn goede prestaties qua kosten en qua reistijdverlies.

De variant zonder ringlijn is de meest slechte variant. Zowel qua robuustheid als reistijdverlies scoort deze variant zeer slecht.

Bij een tramsysteem zijn de verschillen tussen de varianten wat duidelijker. De variant zonder ringlijn scoort het beste. Op maar liefst drie criteria: kosten, variatie in reistijd en reistijdverlies is deze variant de beste variant. Enige minpunt is de robuustheid. Deze is zeer slecht.

Variant 2 eindigt als tweede vanwege zijn goede prestaties qua kosten, variatie in reistijd en reistijdverlies.

Variant 5 is de slechtste variant. Op het gebied van kosten en reistijdverlies scoort deze variant zeer slecht.

Een opvallend verschil tussen de scores voor de netwerkvarianten van een bus- en een tramsysteem is dat de scores bij een bussysteem veel dichter bij elkaar liggen (zelfs met minimale afstand) dan die van een tramsysteem. Het moge duidelijk zijn dat door de grote flexibiliteit van een bussysteem de netwerkvorm minder belangrijk is voor de uitkomsten dan bij een tramsysteem. Daar zijn de netwerkvarianten veel gevoeliger voor de verstoringen in de beschikbaarheid van infrastructuur.

7.4.6 Hebben verstoringen in de beschikbaarheid van infrastructuur een verschillend effect op het dienstennetwerk van rail- en wegvervoer door een verschil in flexibiliteit dat bestaat tussen beide vervoertechnieken?

Voor de drie hoofdeffecten van de verstoringen, kosten, robuustheid en betrouwbaarheid, zal geanalyseerd worden wat de verschillen zijn in effecten tussen de beide vervoertechnieken en hoe het verschil in infrastructuurnetwerk (dat leidt tot het verschil in flexibiliteit) daarbij een rol speelt.

Kosten

Door de grote flexibiliteit in dienstuitvoering van een bussysteem zijn er weinig extra reiskosten (de omwegen zijn namelijk kort) en kosten voor niet gemaakte verplaatsingen (er zijn maar weinig typen verstoringen waarbij geen reparatienetwerk gemaakt kan worden) te zien.

Dit in tegenstelling tot een tramsysteem waar de extra reiskosten en kosten voor niet gemaakte verplaatsingen groter zijn door een kleinere flexibiliteit in de dienstuitvoering. Bij variant 1, 2 en 5 zijn er veel kosten voor niet gemaakte verplaatsingen in een tramstelsel (bijna geen omrijmogelijkheden of te lange omrijmogelijkheden) en bij variant 3,4 en 5 zijn er veel extra reiskosten. (omrijroutes worden steeds langer)

Voor de totale kosten is bij een bussysteem de variant met een centrumringlijn optimaal en bij een tramsysteem de variant zonder ringlijn. Dit is een gevolg van de hogere investeringskosten die bij een tramsysteem gemaakt moeten worden voor nieuwe infrastructuur. Hierdoor scoort variant 1, met relatief weinig infrastructuur, goed.

Wel moet aangetekend worden dat bij een bussysteem variant 1 en 2 qua totale kosten zeer dicht bij elkaar liggen en dat de variant met een kleine ringlijn ook niet slecht scoort. Dit heeft wel overeenkomsten met een tramsysteem, want daar liggen de totale kosten van variant 1 en 2 ook zeer dicht bij elkaar.

De verschillen in flexibiliteit van de dienstuitvoering komen dus terug bij de kosten voor niet gemaakte verplaatsingen en de extra reiskosten. De verschillende uitkomsten qua totale kosten worden vooral bepaald door het verschil in investerings- en exploitatiekosten tussen beide vervoertechnieken.

De verschillen tussen de twee beste netwerkvarianten op basis van totale kosten voor een bus- en een tramsysteem zijn zeer klein.

Robuustheid

Qua robuustheid zijn er weinig verschillen in optimaal netwerk te zien tussen beide vervoertechnieken. Variant 4 scoort qua robuustheid beter dan variant 5 omdat het aantal herkomsten en bestemmingen dat profiteert van de omrijroute van de tram bij een variant met een grote ringlijn groter is dan bij een variant met een buitenringlijn.

Dit verschil speelt niet bij een busnetwerk door de grotere flexibiliteit. Tussen de netwerkvarianten zit bij een bus maar weinig verschil in robuustheid. Bij een tramsysteem zijn er grote verschillen in robuustheid tussen de varianten te zien. Vooral de varianten zonder ringlijn en met een centrumringlijn hebben zeer veel niet gemaakte verplaatsingen vanwege de geringe flexibiliteit van die twee netwerkvormen.

Betrouwbaarheid

Bij een bussysteem valt op dat beide betrouwbaarheidscriteria bijna tegengestelde resultaten opleveren qua optimaal netwerk. Dit betekent dus als er veel verplaatsingen over de norm van 15 % extra reistijd heengaan, dat dat een minimale overschrijding van die norm betreft vanwege het kleine totale reistijdverlies of dat er veel verplaatsingen een klein reistijdverlies hadden (onder de norm). En andersom wordt een groot reistijdverlies veroorzaakt door een klein aantal verplaatsingen die de norm van 15 % extra reistijd flink overschreden hebben. Voor de totale betrouwbaarheid als gevolg van beide betrouwbaarheidscriteria geldt dus dat alle netwerkvarianten bijna gelijk scoren bij een bussysteem. Dit is door de grote flexibiliteit ook te verklaren en dat betekent dat de netwerkvorm van een bussysteem minder belangrijk is voor het goed functioneren van het dienstennetwerk qua betrouwbaarheid.

Bij een tramsysteem leveren beide betrouwbaarheidscriteria nagenoeg wel dezelfde resultaten op. Veel verplaatsingen met een reistijd groter dan 115 % van de ongestoorde reistijd, betekent dus ook een groot reistijdverlies. Over de netwerkvarianten heen (van 1 – 5) is globaal (variant 4 en 5 kunnen nog wel eens wisselen) een stijgende lijn te zien in reistijdverlies en verplaatsingen die de norm overschrijden. Door de toenemende lengte van de omrijroutes in een reparatienetwerk is dit te verklaren.

Conclusies

De verschillen in flexibiliteit tussen weg- en railvervoer komen bij de totale kosten niet terug. Wel bij de kosten voor niet gemaakte verplaatsingen de kosten voor extra reiskosten. Deze twee kostencomponenten hangen sterk samen met de robuustheid en de betrouwbaarheid van het netwerk. Door de grotere dichtheid van het infranet kunnen er bij het bussysteem meer verplaatsingen gemaakt worden dan bij het tramsysteem. Het valt op dat voor de betrouwbaarheid van het netwerk de netwerkvorm bij het bussysteem nauwelijks een rol lijkt

te spelen. Terwijl voor een tramnetwerk de betrouwbaarheid minder wordt bij netwerkvormen met grote omrijroutes.

Er zijn dus zeker verschillen in doorwerking van effecten te zien tussen weg- en railtechniek als gevolg van verstoringen in de beschikbaarheid van infrastructuur.

7.5 Scenario's van verstoringen

7.5.1 Inleiding

Voor ieder verstoringstype is een scenario gemaakt waarin dat type verstoring een verhoogde kans van optreden heeft. De verhoogde kans van optreden komt tot stand door een 10 keer zo kleine tussentijd voor de verstoringen te nemen als in de uitgangssituatie. Alleen voor de kleine verstoringen is een andere maat gekozen vanwege het grote aantal verstoringen van dit type. Hierbij is de tussentijd van de verstoringen gehalveerd. Door middel van scenario's kan geanalyseerd worden wat er mogelijk kan gebeuren als een bepaald type verstoring vaker optreedt. Dit kan reëel zijn door een veranderend klimaat bijvoorbeeld.

Een bussysteem is niet kwetsbaar voor onweer, daarom is voor onweer geen scenario gemaakt bij een bussysteem.

Tevens is het alleen bij storm en sneeuw mogelijk dat er schakels in het dienstennetwerk van een bus uitvallen. Bij de overige verstoringstypen blijft de faaltijd van schakels (faaltijd 1) in het dienstennetwerk en dus van de verplaatsingen gelijk. Eventuele veranderingen die desondanks kunnen optreden in de faaltijd van schakels zijn dus een gevolg van storm en sneeuw. De grootte van deze 'ruis' is niet van belang en daarom is bij de *faaltijd 1* van verplaatsingen en het *aantal niet gemaakte* verplaatsingen bij de kleine verstoringen, ijzel en grote verstoringen een n.v.t. gezet.

Het onderscheid tussen faaltijd 1 en faaltijd 2 van een verplaatsing betreft het verschil tussen een verplaatsing die niet mogelijk is omdat er geen route mogelijk is tussen herkomst en bestemming (faaltijd 1) en een verplaatsing die niet gemaakt wordt omdat de omrijroute te lang is (faaltijd 2)

7.5.2 Resultaten scenario's bussysteem

In tabel 7.9 zijn de resultaten van de scenario's voor het bussysteem weergegeven.

	Eenheid	Uitgangssit.	Kl. Verst.	Storm	IJzel	Sneeuw	Onweer	Gr. Verst.
# verstoringen		360	349 / 697	1 / 8	7 / 52	0 / 4	1 / n.v.t.	2 / 12
totale kosten	mln euro's	146,9	100	100,3	100,3	100,3	n.v.t.	100,5
faaltijd schakel	dagen	0,82	151	146	171	124	n.v.t.	411
gem. faaltijd verpl. 1	uren	1,62	n.v.t.	624	n.v.t.	828	n.v.t.	n.v.t.
gem. faaltijd verpl. 2	uren	0.30	123	247	263	181	n.v.t.	250
# niet gem. verpl.		5121	n.v.t.	629	n.v.t.	854	n.v.t.	n.v.t.
reistijd > norm (1,15)		24277	135	107,2	236	101,0	n.v.t.	392
reistijdverlies	uren	10949	111	102,7	178	82	n.v.t.	355
verschuiving min.		variant 2	-	-	-	-	n.v.t.	-

Tabel 7.9 Resultaten scenario's bussysteem (indexcijfer uitgangssituatie is 100)

Toelichting:

- Alle waarden in de tabel zijn gemiddeldes per jaar over een simulatie van 5 jaar en geven een indexcijfer weer ten opzichte van de uitgangssituatie (100)

- Het aantal verstoringen is de gemiddelde toename van desbetreffend type verstoring; 1 / 8 bij storm betekent dat er in de uitgangssituatie gemiddeld één storm per jaar was en in het scenario zijn er gemiddeld 8 stormen per jaar.
- De faaltijd van een schakel is de gemiddelde tijd dat een schakel in het infrastructuurnetwerk buiten werking is
- De reistijd > norm (1,15) houdt het betrouwbaarheids criterium in. Dit betreft het aantal verplaatsingen dat een reistijd had langer dan $1,15 \times$ de ongestoorde reistijd.
- Een verschuiving van het minimum is een verschuiving in de variant met minimale totale kosten

Analyse:

- Een busnetwerk is qua kosten bijna niet gevoelig voor meer verstoringen
- De grootste verandering van de totale kosten is bij de grote verstoringen: een toename met 0,5 % oftewel 0,7 mln. euro.
- De gemiddelde faaltijd van een schakel in het infranetwerk neemt drastisch toe bij een toename van de grote verstoringen. Dit is een gevolg van de lange duur van deze verstoringen.
- Het aantal niet gemaakte verplaatsingen en de faaltijd van verplaatsingen als gevolg van geen mogelijke route stijgt sterk bij scenario's met veel storm en sneeuw. Dit is logisch omdat meerdere infrastructuurschakels tegelijk uitvallen.
- De betrouwbaarheidsnorm voor een acceptabele reistijd wordt bij de grote verstoringen flink overschreden. Ongeveer 95.000 verplaatsingen voldoen niet aan het criterium. Dit is 4,0 % van het totaal aantal verplaatsingen op jaarbasis.
- Bij sneeuw neemt reistijdverlies af doordat een aantal van de verplaatsingen die in de uitgangssituatie een 'te lange' reistijd had, nu uitvalt. Meer uitval leidt wel tot een slechtere robuustheid van het netwerk.
- Er vindt geen enkele keer een verschuiving van het minimum qua totale kosten plaats. Variant 2 is altijd optimaal.

7.5.3 Resultaten scenario's tramsysteem

Dezelfde scenario's als bij het bussysteem zijn toegepast op het tramsysteem. De toelichting bij de tabel met resultaten voor het bussysteem is dus ook van toepassing op de onderstaande tabel. Dit zijn de resultaten van de scenario's voor een tramsysteem:

	Eenheid	Uitgangssit.	Kl. Verst.	Storm	IJzel	Sneeuw	Onweer	Gr. Verst.
# verstoringen		215	206 / 417	0 / 10	4 / 46	1 / 5	2 / 19	1 / 11
totale kosten	mln euro's	175.3	100,2	100,3	101,2	100,9	100,1	104,1
faaltijd schakel	dagen	0.63	143	151	144	210	113	408
gem. faaltijd verpl. 1	dagen	1.71	122	116	216	211	113	511
gem. faaltijd verpl. 2	dagen	0.49	104.1	127	165	91.8	74	324
# niet gem. verpl.	miljoen	0.09	122	122	222	233	117	522
reistijd > norm (1,15)		74833	102,6	140	170	93,4	71	307
reistijdverlies	uren	19425	101.4	99.4	198	80	107.2	333
verschuiving min.		variant 1	-	variant 2	variant 2	-	-	variant 2

Tabel 7.10 Resultaten scenario's tramsysteem (indexcijfer uitgangssituatie is 100)

Analyse:

- Een tramsysteem is qua kosten het gevoeligst voor grote verstoringen. Daarbij stijgen de totale kosten het meest, namelijk met 4,1 %, dit is 7,1 mln. euro. Een grote stijging is eveneens terug te zien in de gemiddelde faaltijd van een verplaatsing als gevolg van het ontbreken van een mogelijke route. Die is bij het scenario met veel grote verstoringen verreweg het hoogst.
- De betrouwbaarheidsnorm van de reistijd en het reistijdverlies worden bij het scenario met veel grote verstoringen fors overschreden. Dit geldt ook voor het aantal niet gemaakte verplaatsingen, deze stijgen met maar liefst 422 %.
- Na de grote verstoringen is het dienstennetwerk van de tram het meest gevoelig voor ijzel en sneeuw. De totale kosten stijgen dan met respectievelijk 2,1 en 1,5 mln. euro en de niet gemaakte verplaatsingen in de orde grootte van 125 %. Opvallend is wel dat bij sneeuw de betrouwbaarheid op allebei de criteria (normoverschrijding en reistijdverlies) beter wordt (als gevolg van verplaatsingen die niet gemaakt worden)
- De overige scenario's (kleine verst., storm, en onweer) liggen qua kosten en niet gemaakte verplaatsingen dicht bij elkaar.
- Bij 3 van de 6 scenario's is een verschuiving van de beste variant qua totale kosten te zien. Doordat in de scenario's meer schakels in het dienstennetwerk uitvallen, scoort een netwerk met meer omrijmogelijkheden (variant 2) in dat geval beter dan een netwerk met minder alternatieve routes. (variant 1)

7.5.4 Conclusies uit de scenario's van verstoringen

Uit de scenario's is gebleken dat een bussysteem het meest gevoelig is voor een verandering in het aantal stormen en sneeuwbuien. Een tramsysteem is kwetsbaarder voor ijzel, sneeuw en grote verstoringen.

De totale kosten stijgen niet veel bij alle scenario's, van maximaal 0,4 % bij een bussysteem tot 1,3 % bij een tramsysteem. Enige uitschieter is de toename van de totale kosten bij het scenario met grote verstoringen bij de tram; daar stijgen de kosten met 3,9 %.

De robuustheid van het dienstennetwerk daalt bij een bussysteem relatief gezien fors bij storm en sneeuw, (550 en 880 %), maar door het lage aantal niet gemaakte verplaatsingen in de uitgangssituatie is het aantal verplaatsingen dat uitvalt in het ergste geval nog steeds maar 0,20 % van het totaal aantal verplaatsingen. Bij een tramsysteem verslechtert de robuustheid sterk bij het scenario met grote verstoringen. (stijging met 456 %) Dan kan 2,1 % van alle verplaatsingen niet meer gemaakt worden.

De betrouwbaarheid bij het dienstennetwerk van de bus verslechtert vooral als gevolg van ijzel en grote verstoringen. Opvallend is dat de betrouwbaarheid van het netwerk verbetert bij meer sneeuwbuien. (geldt ook voor een tramsysteem) Bij een tramsysteem is een sterke afname van de betrouwbaarheid te zien bij meer grote verstoringen.

De variant met minimale totale kosten blijft bij een bussysteem altijd variant 2. De kosten stijgen in de scenario's slechts marginaal. En als de kosten stijgen, dan stijgen ze voor alle varianten ongeveer even veel, dus geeft dit geen verschuiving in optimum. Wel is het logisch dat de betrouwbaarheid en robuustheid van het dienstennetwerk verslechteren als er meer verstoringen optreden. De resultaten in de uitgangssituatie zijn een goede maatstaf om het effect van verstoringen in de beschikbaarheid van infrastructuur te bepalen.

Bij een tramsysteem verschuift bij de helft van de scenario's het minimum van de totale kosten van variant 1 naar variant 2. Dit betekent dat het niet zo eenduidig is wat de optimale netwerkvariant is. Eerder zagen we dat het verschil tussen beide varianten zeer klein is, 0,3

mln. euro. Dat geringe verschil blijkt terug te komen in de scenario's doordat het optimum regelmatig verspringt. Dit betekent dat de conclusie in de uitgangssituatie dat variant 1 optimaal is, niet heel hard is en dat de frequentie van optreden van alle typen verstoringen een belangrijke rol speelt in de uitkomst voor de optimale variant.

7.6 Gevoeligheden van parameters

7.6.1 Inleiding

Het kan voorkomen dat parameters verkeerd geschat zijn door ontbrekende kennis of dat ze iets minder nauwkeurig bepaald zijn. Door een gevoeligheidsanalyse toe te passen, is een inschatting te maken van de invloed van een parameter op het totaalresultaat en daarmee de relevantie om een bepaalde parameter exact te bepalen en is het effect duidelijk van een eventuele mindere schatting.

Een gevoeligheidsanalyse is toegepast voor:

- ♣ de omrijfactor
- ♣ de waardering van extra reistijd (VOT 2)
- ♣ de overstappenalty
- ♣ de penalty voor niet gemaakte verpl.
- ♣ de investeringskosten van de ringlijn (tram)

Om de gevoeligheid van de parameters te bepalen, zijn ze verdubbeld. Alleen in het geval van de omrijfactor, is gekeken naar het effect op de kosten als er geen omrijfactor is. Verplaatsingen dus waarbij een route mogelijk is in het netwerk, worden altijd gemaakt. In de gevoeligheidsanalyse is louter gekeken naar veranderingen in *kosten* en niet naar eventuele veranderingen in faaltijden van schakels of verplaatsingen omdat het aantal verstoringen gelijk blijft.

Bij een tramsysteem moeten er investeringskosten gemaakt worden om de ringlijn aan te leggen. Om de gevoeligheid van deze investeringskosten te analyseren, is een gevoeligheidsanalyse toegepast op de exploitatiekosten van de ringlijn waar in het model de investeringskosten in verdisconteerd zijn.

Er is onderscheid gemaakt in kosten voor niet gemaakte verplaatsingen als gevolg van het ontbreken van een route tussen herkomst en bestemming (kosten ngem. verpl. 1) en als gevolg van een te lange omrijroute (kosten ngem. verpl. 2)

7.6.2 Resultaten gevoeligheidsanalyse bussysteem

In tabel 7.11 zijn de resultaten van de gevoeligheidsanalyse van het bussysteem weergegeven

	Eenheid	Uitgangssit.	Omrijfactor	VOT 2	Overstap Penalty	Penalty ngem. verpl.
gevoeligheid			1,5 / geen	20 / 40	5 / 10	20 / 40
reiskosten	mln euro's	104.4	100	100,2	112	100
kosten ngem. verpl. 1	mln euro's	0.10	100	110	90	280
kosten ngem. verpl. 2	mln euro's	0.08	0	113	113	213
exploitatiekosten	mln euro's	42.3	100	100	100	100
totale kosten	mln euro's	146.9	99,9	100,1	108,4	100,1
verschuiving min.		variant 2	-	-	-	-

Tabel 7.11 Resultaten gevoeligheidsanalyse bussysteem (indexcijfer uitgangssituatie is 100)

Toelichting:

- In de rij 'gevoeligheid' staat vermeld hoe de parameters veranderen. 20 / 40 betekent dat de uitgangswaarde van de parameter 20 is en in de gevoeligheidsanalyse heeft de parameter een waarde van 40.
- Alle uitkomsten zijn gemiddeldes per jaar berekend met een simulatie over 5 jaar en geven een indexcijfer weer ten opzichte van de uitgangssituatie (100)

Analyse:

- De reiskosten zijn nagenoeg alleen gevoelig voor een verandering in de overstappenpenalty.
- De kosten voor niet gemaakte verplaatsingen zijn marginaal in een bussysteem. (0,10 mln euro) en veranderen ook marginaal. Bij een verandering in de penalty voor niet gemaakte verplaatsingen is het logisch dat de kosten stijgen. De overige fluctuaties zijn een gevolg van veranderende verstoringduren.
- De totale kosten blijken bijna niet gevoelig voor veranderingen in de VOT 2, voor een verdubbelde penalty voor niet gemaakte verplaatsingen en voor weglating van de omrijfactor. Bij deze laatste dalen de totale kosten zelfs licht
- Bij een verdubbeling van de overstappenpenalty is er een verandering in de totale kosten te zien. De totale kosten stijgen dan met 8,4 %.
- Het minimum van de totale kosten blijft bij alle veranderingen in parameters gelijk

7.6.3 Resultaten gevoeligheidsanalyse tramsysteem

In tabel 7.12 staan de resultaten van de gevoeligheidsanalyse uitgevoerd op het tramsysteem

	Eenheid	Uitgangssit.	Omrijfactor	VOT 2	Expl. Kosten ring	Overstap Penalty	Penalty ngem. verpl.
gevoeligheid			1,5 / geen	20 / 40	150 / 300	5 / 10	20 / 40
reiskosten	mln euro' s	103.7	100,5	100,2	100	112	100
kosten ngem. verpl. 1	mln euro' s	1.9	105,3	84	100	89	205
kosten ngem. verpl. 2	mln euro' s	0.8	0	88	100	88	213
exploitatiekosten	mln euro' s	69.0	100	100	125	100	100
totale kosten	mln euro' s	175.3	99,9	99,9	109,6	107,0	101,7
verschuiving min.		variant 1	variant 2	-	-	variant 2	variant 2

Tabel 7.12 Resultaten gevoeligheidsanalyse tramsysteem

Analyse:

- De reiskosten zijn gevoelig voor een verandering in de overstappenpenalty. De reiskosten stijgen dan met 12 %. De kosten voor niet gemaakte verplaatsingen dalen echter doordat reizigers blijkbaar andere routes kiezen die minder uitvallen.
- De kosten voor niet gemaakte verplaatsingen als gevolg van het ontbreken van een route, zijn gevoelig voor weglating van de omrijfactor en uiteraard de penalty voor niet gemaakte verplaatsingen. Verder valt op dat bij een verandering in de VOT 2 de kosten van niet gemaakte verplaatsingen flink dalen. Dit heeft een oorzaak buiten de verandering van de VOT 2 om. (veranderende verstoringduren)
- Door eliminatie van een omrijfactor zijn er geen verplaatsingen meer die niet gemaakt kunnen worden omdat de omrijroute te groot zou zijn.
- De totale kosten veranderen vrij fors bij een verandering in de exploitatiekosten van de ring en bij een grotere penalty voor overstappen. Bij veranderingen in andere

parameters zijn kleine verschillen in de totale kosten te zien. De maximale stijging is te vinden bij een verdubbeling van de exploitatiekosten/uur. Dan stijgen de totale kosten met 10 %.

- Met een grotere penalty voor niet gemaakte verplaatsingen blijkt variant 2 goedkoper te zijn dan variant 1. Bij variant 1 kunnen namelijk meer verplaatsingen niet gemaakt worden dan bij variant 1 en bij hogere waardering van die verplaatsingen scoort variant 2 beter.
- Door een verdubbeling van de overstappenalty is variant 2 financieel aantrekkelijker dan variant 1. Er kunnen bij variant 2 namelijk meer verplaatsingen rechtstreeks gemaakt worden door de komst van een ringlijn.
- Door weglating van de omrijfactor wordt variant 2 de goedkoopste variant. Bij die netwerkvariant kunnen nu meer verplaatsingen gemaakt worden en dat is gunstig voor de waardering in de totale kosten

7.6.4 Conclusies uit de gevoeligheidsanalyse

Voor een bussysteem zijn de veranderingen in de totale kosten door de gevoeligheidsanalyse allemaal zeer marginaal. Alleen een verandering in de overstappenalty geeft een forse stijging in de totale kosten. (6,8 %)

Voor een tramsysteem veranderen de totale kosten logischerwijs fors door hogere investeringskosten in de ringlijn (9,6 %) en door een verdubbeling van de overstappenalty (7,0 %). Een penalty voor niet gemaakte verplaatsingen geeft een gemiddelde stijging van 1,7 % in de totale kosten.

Het minimum qua totale kosten verandert drie keer, bij weglating van de omrijfactor, verdubbeling van de overstappenalty en bij verdubbeling van de penalty voor niet gemaakte verplaatsingen.

Deze conclusies betekenen dat het bussysteem bijna niet gevoelig is voor veranderingen in de gekozen parameters en dat de resultaten in de uitgangssituatie betrouwbare uitkomsten zijn. Een tramsysteem is meer gevoelig voor veranderingen in parameters. Met name in de uitkomsten voor de meest optimale variant qua totale kosten maakt het uit wat er voor waardes gekozen worden. Dit betekent dat de parameters in het model met zorgvuldigheid bepaald moeten worden. Veel verschuivingen in de optimale variant geeft ook nog maar eens aan hoe dicht een variant zonder ringlijn en een variant met een centrumringlijn bij elkaar liggen in uitkomsten.

7.7 Invloed van de verstoringen op het netwerkontwerpniveau

In deze paragraaf zijn de effecten voor iedere partij in het netwerkontwerpprobleem (reiziger, exploitant en overheid) als gevolg van de verstoringen in de beschikbaarheid van infrastructuur op een rij gezet. Deze effecten bepalen de invloed van de verstoringen op het netwerkontwerpniveau.

7.7.1 Effect verstoringen in de dienstuitvoering voor de reiziger

De effecten voor de reiziger komen tot uitdrukking in de reiskosten en de kosten voor de niet gemaakte verplaatsingen.

Effect verstoringen in de dienstuitvoering op de reiskosten van het netwerk

Bij een bussysteem stijgen de reiskosten gemiddeld met 0,19 % door verstoringen in het infranetwerk. Deze stijging is ongeveer gelijk over alle netwerkvarianten heen.

Bij een tramsysteem stijgen de reiskosten vooral bij varianten 3, 4 en 5. Deze stijging is niet groot, 0,24 %.

Effect verstoringen in de dienstuitvoering op de niet gemaakte verplaatsingen

Door verstoringen in het infranetwerk kan er niet altijd een vervoerdienst aangeboden worden. Bij een tramnetwerk komt uitval van een gedeelte van een lijn vaker voor dan bij een busnetwerk.

Per netwerkvariant voor een bus bedragen de kosten voor niet gemaakte verplaatsingen 0,20 mln. euro op een totaal van ongeveer 104 mln. euro. Dit bedrag is voor alle varianten nagenoeg gelijk en is opgebouwd uit 0,10 mln. euro als gevolg van een verplaatsing die niet mogelijk is omdat er geen route is en 0,10 mln. euro voor een verplaatsing die niet gemaakt wordt, omdat de reistijd te groot is. Qua aantal komen beide typen neer op gemiddeld zo'n 5000 verplaatsingen.

Bij een tramnetwerk is het aantal niet gemaakte verplaatsingen bij netwerkvarianten 1 en 2 vrij hoog omdat daar weinig alternatieve routes mogelijk zijn. Ook bij variant 5 is er een fors aantal niet gemaakte verplaatsingen vanwege verplaatsingen die een te lange omrijroute krijgen. Bij de eerste variant bedragen de kosten 5 mln. euro. De verstoringen hebben dus een grote invloed op het gemaakte aantal verplaatsingen. De variant met een kleine ringlijn is de variant met de minste niet gemaakte verplaatsingen.

7.7.2 Effect verstoringen in de dienstuitvoering op de kosten voor de exploitant

De exploitatiekosten veranderen zeer weinig als gevolg van de verstoringen. Dit geldt zowel voor een bus- als een tramsysteem. De extra exploitatiekosten zijn maximaal in de orde grootte van enkele tienduizenden euro's en dus op het totaal te verwaarlozen.

7.7.3 Effect verstoringen in de dienstuitvoering op de kosten voor de overheid

Effect verstoringen in de dienstuitvoering op de totale kosten bussysteem

Bij een bussysteem blijkt het effect van de verstoringen in de dienstuitvoering op de totale kosten niet zo groot. In de uitgangssituatie was de toename van de kosten maximaal 0,27 % t.o.v. de onverstoorte situatie.

In scenario's waarbij bepaalde typen verstoringen vaker optreden, is er maximaal een toename te zien van de totale kosten met 0,5 %.

Bij een gevoeligheidsanalyse met de belangrijkste parameters, is er maximaal een stijging van de totale kosten te zien van 12 %.

In een worst-case scenario dat een combinatie is van het 'slechtste' scenario (sneeuwval) en de variant met de grootste gevoeligheid (dat is een verdubbeling van de overstappenalty) is er een toename van de totale kosten te zien met 9,4 %. Dit geeft aan dat verstoringen en parameters toch nog een redelijke invloed kunnen hebben op de totale kosten van een bussysteem.

Effect van verstoringen in de dienstuitvoering op de totale kosten tramsysteem

Het effect van alle verstoringen op de totale kosten is maximaal 2,3 % ten opzichte van de onverstoorte situatie.

Bij de scenario's is er een maximale toename van de totale kosten waar te nemen van 4,1 %. In de gevoeligheidsanalyse is de maximale stijging van de totale kosten 9,6 % van de totale kosten zonder verstoringen.

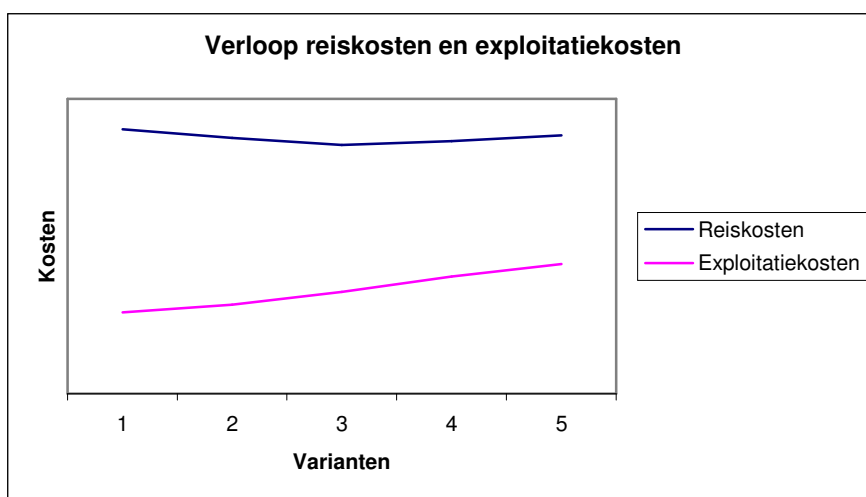
Het worst-case scenario is een combinatie van veel grote verstoringen en een verdubbeling van de overstappenalty. Dit geeft een toename van de totale kosten met 17 %. Dat is een forse toename en zeker iets om rekening mee te houden bij het netwerkontwerp.

7.8 Discussie over gemaakte keuzes en reflectie resultaten naar de ontwerppraktijk

In deze paragraaf met discussie en reflectie worden 3 zaken behandeld. Als eerste wordt gekeken naar de verhouding tussen de exploitatiekosten en de reiskosten. In de tweede plaats wordt iets gezegd over de validiteit van de gemaakte aannames in de analyse. Tenslotte wordt er gereflecteerd op het gebruikte model in de analyse en naar de relevantie van de resultaten voor de ontwerppraktijk

7.8.1 Verhouding exploitatiekosten-reiskosten

De verhouding tussen de exploitatiekosten en de reiskosten is zeer eminent bij de bepaling van het minimum van de totale kosten. Beide kostencomponenten hebben namelijk een verschillend verloop:



Figuur 7.21 Verloop reiskosten en exploitatiekosten

Het minimum van de reiskosten ligt bij variant 3 en van de exploitatiekosten bij variant 1. Afhankelijk van de verhouding tussen de 2 kostencomponenten ligt het minimum van de totale kosten altijd bij variant 1, 2 of 3. Het is niet mogelijk dat variant 4 of 5 optimaal worden.

In dit onderzoek is de verhouding tussen exploitatiekosten en reiskosten voor bus en tram in de onverstoorde situatie als volgt:

	Bus	Tram
Verhouding expl.kosten - reiskosten	29 – 71 %	39 – 61 %

Tabel 7.13 Verhouding exploitatiekosten-reiskosten voor beide vervoertechnieken

Het vraagpatroon bij een bus- en een tramsysteem is gelijk aangenomen. In werkelijkheid is dit niet zo. Een tram heeft een grotere capaciteit dan een bus en een tramnetwerk vervoert over het algemeen meer passagiers dan een busnetwerk. Als gevolg van het gelijk aangenomen vraagpatroon is het aandeel exploitatiekosten bij een tramsysteem hoger dan bij een bus. Dit verklaart ook deels waarom het optimum van de totale kosten bij een tramsysteem op variant 1 uitkomt en bij een bussysteem op variant 2.

7.8.2 Validiteit gemaakte aannames

Aannames voor het *aantal verstoringen* per type zijn gebaseerd op eigen ervaring m.b.t. het weer in Nederland, op het gesprek met een medewerker van de HTM en op basis van ongevallencijfers van de gemeente Den Haag. Belangrijk hierbij is niet het precieze aantal, maar de orde grootte van de verstoringen. Door bovengenoemde bronnen is daar een goed beeld over ontwikkeld. Het aantal ijzelperiodes is wel iets te hoog geschat. In werkelijkheid treedt er minder vaak ijzel op dan dat er gesimuleerd is.

Aannames voor de *impact van de verstoringen* op het infra- en het dienstennetwerk zijn vooral gestoeld op het gesprek met de medewerker van de HTM. De uitkomsten van zo'n gesprek zijn valide voor de stad Den Haag en het dienstennetwerk van de HTM. Het is mogelijk dat in een andere stad de vervoermaatschappij anders met verstoringen omgaat. Echter zal het uitgangspunt van iedere vervoerder hetzelfde zijn en dat is proberen onder alle omstandigheden een vervoerdienst te leveren. Dit uitgangspunt is gebruikt in de analyse. Een mogelijkheid die is uitgesloten in het model, is het aanbieden van een alternatieve vervoerwijze als er een schakel uitvalt. Bijvoorbeeld een bus inzetten als het tramnetwerk verstoord raakt. In werkelijkheid gebeurt dit ook.

In het model is aangenomen dat het in een bussysteem *altijd* mogelijk is om een reparatienetwerk te maken. In werkelijkheid is dat niet altijd zo eenvoudig of zelfs onmogelijk. Tegenwoordig zijn er veel 30 km/h-zones met obstakels waardoor het onmogelijk is voor een bus om die infrastructuur te gebruiken. De flexibiliteit van een bussysteem is dus overschat in deze studie. Een bus heeft niet de beschikking over het gehele infrastructuurnetwerk.

Er is geen verschil in waardering aangenomen tussen overstaptijd en rijtijd in de voertuigen. Dit is vaak wel gebruikelijk omdat reizigers overstaptijd zeer negatief waarderen vanwege het grote discomfort dat dat met zich meebrengt. Een hoge overstappenalty had het verschil in waardering kunnen representeren, maar deze is in het model gelijk aan de gemiddelde overstaptijd, dus deze geeft puur de reistijd weer en geen discomfort. Het model geeft dus vrij optimistische uitkomsten qua reistijd en waardering van de reistijd. In werkelijkheid zijn de reiskosten wat hoger.

7.8.3 Reflectie op het gebruikte model en de relevantie voor de ontwerppraktijk

Het gebruikte model voor dit onderzoek is zeer geschikt geweest om de effecten als gevolg van verstoringen in de beschikbaarheid van infrastructuur in kaart te brengen. Voor verder onderzoek kan dit model ook nog gebruik worden. Het is immers mogelijk om bijvoorbeeld andere kansverdelingen in te voeren voor de frequentie en de tijdsduur van de verstoringen of om eenvoudigweg het aantal verstoringen te verhogen. Het kortstepad-algoritme dat gebruikt is, is ook geschikt om compleet andere netwerkvormen door te rekenen. Een andere toedelingsmethode toepassen binnen het huidige model, is wat gecompliceerder. Het model

rekent binnen een acceptabele rekentijd van ongeveer 3 minuten een bussysteem voor de duur van een jaar door en in ongeveer 10 minuten een tramsysteem. Een tramsysteem is gecompliceerder om door te rekenen omdat er vaker naar alternatieve routes voor de reizigers gezocht moet worden.

Wanneer we de uitkomsten van het onderzoek proberen te koppelen naar de ontwerppraktijk voor het ontwerpen van dienstennetwerken, dan is een eerste belangrijk aspect de doelfunctie die gehanteerd wordt. Als de doelfunctie kostenminimalisatie inhoudt, dan is de verhouding tussen de reiskosten en de exploitatiekosten van eminent belang. Deze bepaalt dan waar het minimum komt te liggen, maar dat is altijd bij variant 1, 2 of 3 zoals eerder gezien in deze paragraaf. Wel is het duidelijk dat er nog een verschil in investeringskosten en exploitatiekosten is tussen rail- en weggebonden vervoer, echter is er ook een verschil in vervoervraag tussen rail- en weggebonden vervoer wat de kosten weer kan dekken. Dat verschil in vervoervraag is in dit onderzoek niet aan de orde gekomen. Wel is duidelijk dat een uitgebreid dienstennetwerk met veel infrastructuur (variant 4 en 5) qua kosten niet goed scoort. Een soberder netwerk met slim aangelegde kortsluitschakels is veel beter. Slim aangelegde kortsluitschakels zijn schakels die voor noodverbindingen kunnen zorgen op plaatsen waar veel vervoervraag is. In het huidige netwerk is de plaats met veel vervoervraag, het centrum. Aan het einde van de radiaallijnen is het aantal verplaatsingen in het dienstennetwerk veel kleiner dan dicht bij het centrum. Varianten 2 en 3 zorgen voor kortsluitschakels rondom het centrum en scoren daarom goed. Het minimaliseren van de totale kosten is dus een geschikte maat om een netwerk te ontwerpen, mits er goed gekeken wordt naar de positie van de kortsluitschakels om een optimale prestatie van het netwerk te krijgen.

Als de doelfunctie het maximaliseren van de robuustheid inhoudt, betekent dit dat goed vertakte netwerken (zoals variant 4 en 5) met veel verbindingen de beste netwerkvormen zijn. Het maximaliseren van de robuustheid is echter geen goede doelfunctie omdat het budget voor investering vaak niet toereikend is om het gewenste netwerk te realiseren. Het kan wel goed zijn om een bepaalde mate van robuustheid te eisen als randvoorwaarde voor een acceptabel netwerk. Hiermee kan tevens aan de eisen van de gebruiker tegemoet gekomen worden.

Als men bij het ontwerpen een bepaalde basisvorm van een dienstennetwerk in gedachten heeft, kan men ook kijken naar de marginale verbetering van de robuustheid bij het aanleggen van bepaalde kortsluitschakels. Op deze manier kan iedere keer de meest waardevolle kortsluitschakel gevonden worden en kan men doorgaan zo lang als dat het budget dat toelaat.

Met een doelfunctie die het maximaliseren van de betrouwbaarheid beoogt, komt men bij weggebonden vervoer niet tot een eenduidig antwoord. De uitkomsten qua reistijdverlies en qua overschrijding van de 15 %-norm van de reistijd zijn bijna precies tegengesteld. Dit lijkt hierdoor niet geschikt voor een doelfunctie. Bij railgebonden vervoer komen de uitkomsten op het gebied van reistijdverlies en variatie in reistijd wel overeen. Een variant zonder ringlijn scoort dan logischerwijs het beste omdat er daar geen reistijdverlies en dus ook geen variatie in reistijd mogelijk is. Dit is op te vatten als een zeer betrouwbaar netwerk, maar de keerzijde is dat er veel verplaatsingen niet mogelijk zijn bij een optredende verstoring. Dit leidt dus niet tot gewenste uitkomsten voor het ontwerp van een dienstennetwerk. Een bepaalde mate van betrouwbaarheid opnemen als randvoorwaarde bij het ontwerpen van een dienstennetwerk zou wel mogelijk zijn alhoewel bij weggebonden vervoer het dilemma tussen reistijdverlies en variatie in reistijd blijft.

Afsluitend valt te zeggen dat het minimaliseren van de kosten een geschikte doelfunctie is om een dienstennetwerk te ontwerpen. Als men de niet gemaakte verplaatsingen en de extra reistijd (bij het maken van een omweg) uitdrukt in kosten, dan worden automatisch de robuustheid en de betrouwbaarheid ook verdisconteerd in het resultaat.

En uit dit onderzoek kan geconcludeerd worden dat het zowel voor weggebonden als railgebonden vervoer zo is dat een sober netwerk met goedgekozen kortsluitschakels zorgt voor een optimale prestatie tegen acceptabele kosten.

Hoofdstuk 8 Conclusies en aanbevelingen verder onderzoek

8.1 Inleiding

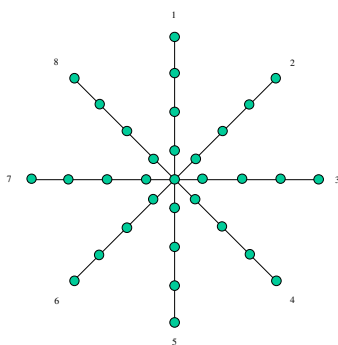
Dit hoofdstuk is de afsluiting van het onderzoek. In de volgende paragraaf worden de belangrijkste conclusies genoemd. En in paragraaf 8.3 worden aanbevelingen gedaan voor verder onderzoek.

In dit rapport is onderzoek gedaan naar de effecten van verstoringen in de beschikbaarheid van infrastructuur voor het netwerkontwerpniveau van stedelijk openbaar vervoer. Hiervoor is een case-studie opgezet waarin het netwerkontwerp probleem is vormgegeven door 5 dienstennetwerkvarianten waarbij de ontwerp vraag de positie van de ringlijn inhoudt.

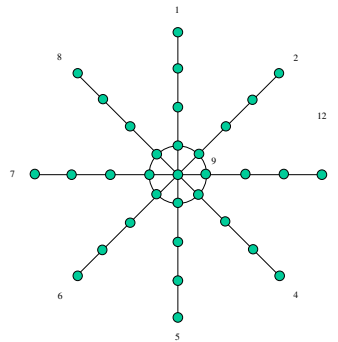
Vanwege een verschil in flexibiliteit van de dienstuitvoering van weg- en railtechniek zijn deze twee vervoertechnieken, vormgegeven door een bus- en een tramnetwerk, vergeleken met elkaar. Er is een model gemaakt waarin de effecten van verstoringen in de beschikbaarheid van infrastructuur berekend worden voor het gebruik en de kosten van het dienstennetwerk. Het gebruik en de kosten variëren over de tijd. Met het model is iets te zeggen over de gevolgen van verstoringen voor het netwerkontwerp. De belangrijkste conclusies uit deze analyse staan in de volgende paragraaf.

8.2 Conclusies

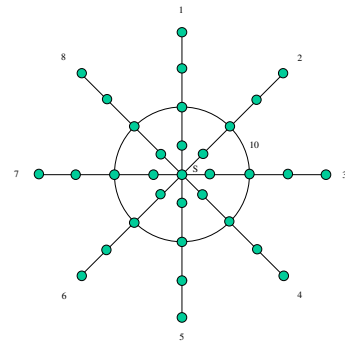
De analyse om de effecten van verstoringen voor het netwerkontwerpniveau te berekenen, is toegepast voor de volgende 5 dienstennetwerkvarianten:



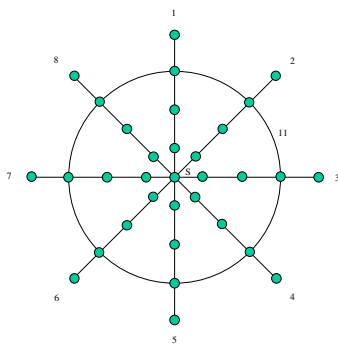
Variant 1 Geen ringlijn



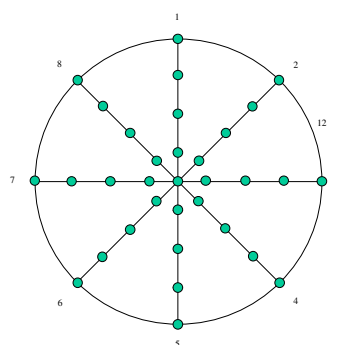
Variant 2 Centrumringlijn



Variant 3 Kleine ringlijn



Variant 4 Grote ringlijn



Variant 5 Buitenringlijn

Voor zowel de bus- als het tramsysteem zijn deze 5 netwerkvarianten toegepast.

De belangrijkste conclusies vallen in drie delen uiteen:

- ♣ **1 Optimale netwerkvariant is verschillend vanuit kostenooqpunt, robuustheid en betrouwbaarheid**
- ♣ **2 Door een verschil in flexibiliteit van het dienstennetwerk tussen weg- en railtechniek hebben verstoringen een verschillend effect**
- ♣ **3 Het effect van de verstoringen op de totale kosten van een bus- en een tramsysteem is niet groot**

Deze conclusies zullen achtereenvolgens toegelicht worden.

Conclusie 1 Optimale netwerkvariant is verschillend vanuit kostenooqpunt, robuustheid en betrouwbaarheid

bussysteem

Wanneer we de dienstennetwerkvarianten van het bussysteem rangschikken van beste naar slechtste variant voor de criteria kosten, robuustheid en betrouwbaarheid, dan is bij een bussysteem een vrij diffuus beeld te zien: (tabel 8.1)

Criterion	Beste variant		BUS		Slechtste variant
Kosten	2	1	3	4	5
Robuustheid	5	4	3	2	1
Betrouwbaarheid	4	1/5	1/5	2/3	2/3

Tabel 8.1 Score van netwerkvarianten van een bussysteem voor de drie hoofdcriteria

De betrouwbaarheid van het dienstennetwerk is een samenvoeging van de twee indicatoren daarvoor: het reistijdverlies en het aantal verplaatsingen dat een extra reistijd had die groter was dan 15 % van de onverstoorde reistijd. (daarom eindigen sommige varianten gelijk met elkaar qua score)

Voor geen enkel criterium lijkt de rangschikking van de varianten op elkaar. Dit is een gevolg van de grote flexibiliteit die het busnetwerk kent in het model. Vaak kan een reparatienetwerk gemaakt worden bij een verstoring waardoor de feitelijke netwerkvorm ondergeschikt raakt en het meer aankomt op een analyse op schakelniveau waarbij dan de verstoringen die wel voor uitval van schakels zorgen, het verschil maken. Deze verschillen zijn echter zeer gering. Dat maakt het aannemelijk dat bijna iedere variant wel een keer goed scoort op een bepaald criterium.

De variant met een centrumringlijn is de meest optimale variant vanuit kostenooqpunt. Deze scoort iets beter dan variant 1 zonder ringlijn. De variant met een buitenringlijn is het duurst. Deze heeft vooral hoge exploitatiekosten.

De meest robuuste variant is de variant met een buitenringlijn. Hierbij zijn de meeste alternatieve routes beschikbaar en kunnen de meeste verplaatsingen gemaakt worden. De variant zonder ringlijn scoort het slechtst. Deze netwerkvorm is het meest kwetsbaar voor verstoringen.

Qua betrouwbaarheid is variant 4 het beste. Dit komt met name doordat deze variant het kleinste reistijdverlies heeft van alle varianten.

tramsysteem

De rangschikking van de netwerkvarianten naar de verschillende criteria geeft bij een tramsysteem geen uniform beeld te zien, maar geeft meer overeenkomsten dan een bussysteem. (tabel 8.2)

Criterion	Beste variant		TRAM		Slechtste variant
Kosten	1	2	3	4	5
Robuustheid	4	5	3	2	1
Betrouwbaarheid	1	2	3	4/5	4/5

Tabel 8.2 Score van netwerkvarianten van een tramsysteem voor de drie hoofdcriteria

De scores van de netwerkvarianten qua betrouwbaarheid en kosten komen goed met elkaar overeen, maar de prestatie qua robuustheid is bijna tegengesteld.

Bij een tramsysteem kan veel minder vaak een reparatienetwerk gemaakt worden. Dit hangt sterk af van de netwerkvorm. Daarom scoort de variant zonder ringlijn het best qua betrouwbaarheid omdat daar namelijk geen enkele variatie in reistijd mogelijk is.

Tegelijkertijd kunnen bij deze netwerkvariant veel verplaatsingen niet gemaakt worden door het ontbreken van alternatieve routes in geval van een verstoring.

Bij variant 4 en 5 zijn de omrijmogelijkheden groter en ook de omweg is groter, dus die varianten scoren slecht voor de betrouwbaarheid. Qua robuustheid scoren deze varianten wel goed omdat bij deze varianten veel alternatieve routes mogelijk zijn in geval van een verstoring.

Qua kosten is de variant zonder ringlijn de meest optimale variant. Deze heeft namelijk de minste exploitatiekosten, wel veel kosten door niet gemaakte verplaatsingen, maar de investerings- en exploitatiekosten bij de variant met een centrumringlijn zijn toch zo hoog dat deze variant hoger uitkomt dan variant 1. De variant met een buitenringlijn is het duurst vanwege de gigantisch hoge investerings- en exploitatiekosten die gemaakt moeten worden voor de ringlijn.

Beide vervoersystemen laten wel zien dat de verschillende criteria geen identieke netwerkvarianten oplevert en dat dus niet louter naar de minimalisatie van de kosten gekeken kan worden bij het netwerkontwerpprobleem.

Conclusie 2 Door verschil in flexibiliteit van het dienstennetwerk tussen weg- en railtechniek hebben verstoringen een verschillend effect

De verstoringen in de beschikbaarheid van infrastructuur hebben een grotere doorwerking op het tramsysteem dan op het bussysteem. In het tramsysteem komt het nu eenmaal sneller voor dat verplaatsingen niet gemaakt kunnen worden waardoor de verstoringen tot grotere kostenposten en grotere aantallen verplaatsingen leiden die niet gemaakt kunnen worden.

Door de grote flexibiliteit van het bussysteem in de analyse is bijna elke netwerkvariant robuust te noemen omdat de gemiddelde uitval slechts 5.000 verplaatsingen bedraagt op de 23,6 mln. Voor de robuustheid van het dienstennetwerk is de netwerkvorm bij een bussysteem dus van minder belang dan voor een tramsysteem.

Ook de extra kosten als gevolg van verstoringen benadrukken dat het verschil in flexibiliteit tussen beide vervoertechnieken een rol speelt. De maximale stijging in de totale kosten scheelt een factor 10 tussen weg- en railtechniek.

Conclusie 3 Het effect van de verstoringen op de totale kosten van een bus- en een tramsysteem is niet groot

Uiteindelijk leiden de verstoringen niet tot erg grote stijgingen in de totale kosten. De maximale stijging in de totale kosten van een bussysteem is 2,5 % en bij een tramsysteem is deze stijging maximaal 24 %. Ook veranderen de optimale netwerkvarianten niet in de situatie *met* verstoringen ten opzicht van de situatie *zonder* verstoringen. Dit geldt voor alle betrokken partijen bij het netwerkontwerpprobleem. (zie tabellen 8.3 en 8.4)

Echter is het wel zo dat door scenario's waarin bepaalde verstoringen vaker optreden en door gevoeligheden van bepaalde parameters de totale kosten nog wel wat hoger kunnen worden. En zeker bij een tramsysteem is dat dan een stijging van de kosten om toch wel rekening mee te houden.

Onverstoord	Reiskosten	Exploitatiekosten	Totale kosten
	<i>Reiziger</i>	<i>Investeerder</i>	<i>Overheid</i>
Bus	Variant 3	Variant 1	Variant 2
Tram	Variant 3	Variant 1	Variant 1

Tabel 8.3 Optimale netwerkvarianten voor de betrokken partijen onverstoorde situatie

Verstoord	Reiskosten	Exploitatiekosten	Totale kosten
	<i>Reiziger</i>	<i>Investeerder</i>	<i>Overheid</i>
Bus	Variant 3	Variant 1	Variant 2
Tram	Variant 3	Variant 1	Variant 1

Tabel 8.4 Optimale netwerkvarianten voor de betrokken partijen verstoorde situatie

Wel moet gezegd worden dat zowel in de situatie zonder als met verstoringen netwerkvariant 1 en 2 qua uitkomsten voor een bus- en een tramsysteem zeer dicht bij elkaar liggen.

8.3 Aanbevelingen verder onderzoek

In dit onderzoek is aandacht besteed aan de verstoringen die kunnen ontstaan in de beschikbaarheid van infrastructuur. Er zijn ook nog verstoringen in de vervoervraag (verplaatsingenpatroon) en verstoringen die direct op de vervoerdiensten aangrijpen. (zie hoofdstuk 3) Het is zeer aan te bevelen om de verstoringen in deze twee lagen van het transportsysteem verder te onderzoeken en te analyseren wat het effect van deze verstoringen is op de kosten en het gebruik van een stedelijk OV-netwerk.

Uit dit onderzoek met een ring-radiaal dienstennetwerk kwam een sober dienstennetwerk met slim gekozen kortsluitschakels als beste ontwerp naar voren. Het is interessant om deze hypothese voor andere netwerkvormen te onderzoeken en te kijken of de hypothese dan nog steeds geldt.

Naast andere netwerkvormen zou een analyse zoals die nu uitgevoerd is, ook toegepast kunnen worden op grotere schaal netwerken zoals het treinsysteem of op een regionaal OV-systeem zoals streekbussen.

Het is interessant om deze analyse toe te passen voor een reële case. Dan kunnen eventuele zwakke plekken in het dienstennetwerk gevonden worden en ontstaat er een beeld van de effecten van verstoringen in dat case-netwerk. Het is mogelijk om aan de hand van het model suggesties aan te dragen voor verbetering van het dienstennetwerk.

In de analyse is geen insteltijd gebruikt voor veranderingen in het dienstennetwerk. Tegelijk met het begin van een verstoring, verandert het dienstennetwerk. In werkelijkheid zit hier een langere tijd tussen en betekent dit dat de flexibiliteit van het dienstennetwerk is overschat. In verder onderzoek zou dit aspect verdisconteerd kunnen worden.

De flexibiliteit van het busdienstennetwerk is ook overschat doordat is aangenomen dat de bus het gehele weginfrastructuur ter beschikking heeft en er bijna overal wel een alternatieve route is te vinden in geval van een verstoring. Dit laatste is sowieso niet het geval en ook kan een bus niet alle weginfrastructuur gebruiken omdat er tegenwoordig steeds meer 30 km/h-zones ontstaan in steden die slecht of helemaal niet toegankelijk zijn voor een bus.

Er is geen correlatie tussen ongevallen en het tijdstip van de dag aangenomen in de analyse. Terwijl het goed denkbaar is dat juist op tijdstippen dat het druk is, er ongevallen gebeuren en het effect van ongevallen dus groter is dan nu is aangenomen. In een verder onderzoek waarin meer gevarieerd wordt met de vraag, zou deze relatie toegepast kunnen worden.

De HTM geeft een rooskleurig beeld van de wijze waarop zij met verstoringen omgaan. De echt grote calamiteiten krijg je waarschijnlijk niet te horen. Dus het is goed mogelijk dat de werkelijke impact van verstoringen groter is dan nu aangenomen is.

Voor een bus- en een tramsysteem is dezelfde vervoervraag gebruikt. In werkelijkheid ligt de vervoervraag van een tramsysteem aardig wat hoger dan voor een bussysteem. Dit geeft een verschil in de verhouding tussen reiskosten en exploitatiekosten. Bij een hogere vervoervraag wordt het aandeel reiskosten van het tramsysteem groter en na een summiere analyse met een grotere vervoervraag blijkt dan ook een netwerkvariant met een centrumringlijn optimaal te zijn i.p.v. een dienstennetwerk zonder ring. Het tramsysteem zou dus met een realistischer vervoervraag t.o.v. het bussysteem onderzocht kunnen worden.

Aanbevelingen voor verbetering van het model

In het huidige model is voor een herkomst en een bestemming slechts naar de kortste route gezocht omdat de alles-of-niets todelingsmethode alle reizigers via de kortste route toedeelt. Wil men een andere todelingsmethode toepassen, dan zullen meerdere routes tussen herkomsten en bestemmingen gevonden moeten worden.

Er zou verder onderzoek gedaan kunnen worden naar het gedrag van reizigers in het netwerk omdat nu veel reacties van gebruikers op verstoringen zijn aangenomen in het model. Gedragsaannames omtrent het niet wenselijk zijn van routes die langer zijn dan 1,5 keer de normale reistijd, zouden misschien kunnen worden aangepast.

De overstappenalty die nu in het model aanwezig is, is eigenlijk geen penalty, maar alleen de gemiddelde wachttijd. Deze is te laag geschat en verdient aanbeveling om aangepast te worden naar een meer realistischer waarde.

Voertuigen die eventueel vol zijn, zijn nu buiten beschouwing gelaten. In een verdere analyse zou er capaciteit aan de voertuigen toegekend kunnen worden en dus ook aan de OV-lijnen. Dit voorkomt dat bij een verstoring veel reizigers ineens een andere route kiezen.

Literatuurlijst

- Barla P., C. Constantatos, (2000), Airline network structure under demand uncertainty, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation review Vol. 36*, pp. 173-180
- Bell M.G.H., (1999), A game theory approach to measuring the performance reliability of transport networks, *Transportation Research Part B 34*, pp. 533-545
- Bovy P.H.L., R. van Nes, (2004), *Dictaat CT 5802 Advanced transportation modelling and network design*, TU Delft, pp. 77-85
- Bovy P.H.L., Th.J.H. Schoemaker, A.J. van Binsbergen, R. van Nes, (2000), *dictaat CT 3750 Vervoersystemen en verkeersnetwerken*, TU Delft, pp. 1.9 – 1.12
- Boyce D.E., L.J. Leblanc, G.R.M. Jansen, (1990), Design of a toll system for a congested intercity road network: the Dutch road pricing system, *paper prepared for the North American Meetings, Regional Science Association International*
- Bruinsma F.R., P. Peeters, P. Rietveld, D.J. van Vuuren, (1999), Betrouwbaarheid van de openbaarvervoerketen, *Tijdschrift Vervoerswetenschap nr. 2*, pp. 93-111
- Chen A., W.W. Recker, (2000), Considering risk taking behaviour in travel time reliability, *Institute of Transportation Studies, University of California, Irvine, UCI-ITS-WP-00-24*
- Dijkstra E.W., (1959), A note on two problems in connection with graphs. *Numerische Mathematik 1*, pp. 269-271
- Dubois D., G. Bel, M. Llibre, (1979), A set of methods in transportation network synthesis and analysis, *Journal Operational Research Society Vol. 30 No. 9*, pp. 797-808
- Furth P.G., N.H.M. Wilson, (1981), Setting frequencies on bus routes: Theory and practice, *Transportation Research Record 818*, pp. 1-7
- Goldberg A.V., C. Harrelson, (2004), Computing the shortest path: A* Search meets graph theory, *Technical Report MSR-TR-2004-24*
- Hagberg B., D. Hasselström, (1980), A method to assign frequencies and vehicle types to fixed route urban public transport systems, *Volvo Transportation Systems*, Gothenburg
- Hasselström D., (1979), A method for optimisation of urban bus route networks. *Volvo Transportation Systems*, Gothenburg
- Kok A., (2004), Interview over effecten ongevallen bij de HTM
- Lampkin W., P.D. Saalmans, (1967), The design of routes, service frequencies and schedules for a municipal bus undertaking: A case study, *Operational Research Quarterly Vol. 18 No. 4*, pp. 376-397
- Magnanti T.L., R.T. Wong, (1984), *Fundamentals of transportation systems analysis, Volume 1: Basic Concepts*, The MIT Press, Cambridge

- Nes van R., (1999), *Design of multimodal transport systems*, pp. 58-66
- Nes van R., (2000), *dictaat vk 3750 Vervoerssystemen en verkeersnetwerken*, pp. 1.12
- Nes van R., (2002), *Design of multimodal transport networks: a hierarchical approach*, Delft University Press
- Nes van R., R. Hamerslag, B.H. Immers, (1988), Design of pubic transport networks, *Transportation Research Record 1202*, pp. 74-83
- Nielsen O.A., (2000), A stochastic transit assignment model considering differences in passenger's utility functions, *Transportation Research Part B Methodological Vol. 34B No. 5*, pp. 337-402
- Nuzollo, A., U. Crisanni, F. Russo, (2001), Schedule-Based Dynamic Path Choice and Assignment Models for Public Transport Networks. *9th World Conference on Transportation Research (WCTR)*, Presentation/abstract, Special Session on Route Choice models, 26/7.Seoul, Korea.
- Pierick K., K.D. Wiegand, (1976), Methodical formulations for an optimization of railway long-distance passenger transport, *Rail International 6*, pp. 328-333
- Rich E., K. Knight, (1991), *Artificial Intelligence Second Edition*, McGraw-Hill
- Russel S., P. Norvig, (1995), *Artificial Intelligence: A modern Approach*, Prentice-Hall
- Schagen I.L.N.G. van, (2000), De verkeersonveiligheid in Nederland tot en met 1999, *SWOV, Leidschendam*, pp. 29
- Scheele S., (1982), A supply model for public transport services, *Transportation Research 14B*, pp. 133-148
- Simonis C., (1981), Optimierung von Omnibuslinien, *Stadt Region Land B26*
- Spieß H., (1993), Transit equilibrium assignment based on optimal strategies: An implementation in EMME/2
- Vaughan R., (1987), *Urban Spatial Traffic Patterns*, Pion Ltd., London, England, pp. 334
- Werkgroep Verkeersveiligheid Den Haag (2003), Verkeersveiligheidsplan 2003-2006, *gemeente Den Haag*
- Xiong Y., J.B. Schneider, (1992), Transportation network design using a cumulative genetic algorithm and neural network, *Transportation Research Record 1364*, pp. 37-44
- Xiong Y., J.B. Schneider, (1995), Processing of constraints in transportation network design problem, *Journal of Computing in Civil Engineering Vol. 9 No. 1*, pp. 21-28

Yamada T., Y. Yoshimura, K. Mori, (2004), Road network reliability analysis using vehicle routing and scheduling procedure, *Logistic systems for sustainable cities*, eds E. Taniguchi and R.G. Thompson, Pergamon

Yang H., M.G. Bell, (1998), Model and algorithms for road network design: a review and some new developments, *Transport Reviews Vol. 18 No. 3*, pp. 257-278

Yin Y., H. Ieda, (2002), Optimal improvement scheme for network reliability, *Transportation Research Record, 1783*, pp. 1-6

Internet

Internetbron 1: <http://mmc.et.tudelft.nl/presan/node26.html>, negatief exponentiële verdeling

Verslag gesprek bij de HTM op 14 december 2004

Bij de HTM heb ik een gesprek gehad met dhr. Kok. Hij is het hoofd van de ongevallen- en verstoringendienst. Bij elke verstoring die optreedt in het bus- of tramnetwerk van de HTM is hij betrokken en wordt hij op de hoogte gehouden. Hij werkt inmiddels al zo'n 40 jaar bij de HTM. We hebben gesproken over de verstoringen die ik simuleer in mijn model: Hoe vaak die soorten verstoringen optreden, waar ze optreden en hoe ze met verstoringen omgaan. Dat was zeer interessant en er kwamen een aantal verrassende zaken uit.

Ongevallen

Het doel voor de HTM bij iedere verstoring is om zo snel mogelijk de dienstuitvoering weer te hervatten. Dit doen ze door bijvoorbeeld bij ongevallen de betrokken voertuigen aan de kant te takelen zodat een tram of bus kan passeren. Hierdoor wordt het aantal ongevallen waarbij de dienstuitvoering echt gestoord wordt, beperkt tot een minimum. Dit is een lager aantal dan in eerste instantie was geschat door mij.

Bussen laten ze zoveel mogelijk een straat omrijden bij een ongeval. En bij trams zoekt de HTM naar een alternatieve route in het netwerk. Deze is vaak wel te vinden, zeker in het centrumgebied van de stad waar het tramnetwerk verdicht is en er kortsluitschakels aanwezig zijn. Aan de uiteindes van de tramlijnen is er geen omrijmogelijkheid. Dat is tegelijkertijd het grote verschil tussen een bus- en een tramnetwerk. Een bus kan alle weginfrastructuur gebruiken (ook die infrastructuur die niet tot het dienstennetwerk behoort) voor een alternatieve route terwijl een tram afhankelijk is van de railinfrastructuur die er ligt.

Weersinvloeden

Bij storm maakt de HTM onderscheid in een normale en een zware storm. Bij een normale storm vallen er alleen wat takken. Die kunnen snel opgeruimd worden. Maar bij een zware storm kunnen er bomen omwaaien en dan wordt de overlast voor de dienstuitvoering groter. Een omgewaaide boom zorgt al snel voor een verstoring van minstens 2 uur. Is de bovenleiding van het tramnetwerk getroffen, dan duurt de verstoring langer. Bij de HTM houden ze de weersvoorspellingen altijd in de gaten en zijn er soms al mensen op straat aanwezig als ze een extreme storm verwachten die snel kunnen optreden bij een verstoring.

IJzel zorgt vooral 's ochtends vroeg voor overlast. Dan worden de wegen nog niet druk bereden en kan het ook gevaarlijk zijn om te pekelen. Overdags krijgt de ijzel vaak minder kans doordat de temperatuur van de weg hoger is door het verkeer. De HTM probeert bij ijzel overdags zolang mogelijk de dienstuitvoering te handhaven. 's Ochtends kan het voorkomen dat ze wachten met het beginnen van de dienstuitvoering totdat de situatie op de wegen veilig is. In het tramsysteem treedt 1 à 2 keer per jaar een draadbreek op als gevolg van de ijzel.

De HTM geeft aan dat ze van sneeuw weinig overlast hebben omdat er dan veel gepekeld wordt. Het kan zijn dat de dienstuitvoering tijdelijk even buiten werking is, maar meestal duurt dat niet lang.

Onweer zorgt ook wel eens voor verstoringen in het tramsysteem als de bliksem op een transformatorhuisje of een wisselkast inslaat. Dit komt zo eens à twee keer in het jaar voor. Het tramsysteem is in segmenten verdeeld, waarbij er bij blikseminslag maximaal één segment uitvalt.

Grote verstoringen

Wat betreft de grote verstoringen, kwamen er verrassende dingen uit het gesprek. Zo bleek dat het bus- en tramnetwerk nauwelijks gehinderd wordt door bouwwerkzaamheden. Zowel in het centrum als op nieuwbouwlocaties. Hierover worden namelijk goede afspraken gemaakt tussen de HTM en de bouwbedrijven. Binnen de HTM zijn er twee mensen full-time in dienst die zich daarmee bezighouden. Bouwwerkzaamheden waarbij de dienstuitvoering gehinderd wordt, worden allemaal 's nachts gepland. Zijn er korte werkzaamheden zoals een betonmolen die moet komen of iets wat getakeld moet worden, dan kan dat tussen 2 trams of bussen door gebeuren.

De enige werkzaamheden waar het openbaar vervoer last van had, waren grote reparatie- en onderhoudswerkzaamheden waarbij dan voor een langere tijd een stuk weg of rails er uitgaat. (ongeveer 2 weken) In die tijd worden dan allerlei werkzaamheden gebundeld, zodat er veel kan gebeuren. De kleine onderhoudswerkzaamheden vinden 's nachts plaats of overdag tussen de voertuigen door.