

Vaker een trein, da's pas fijn!?

Onderzoek naar de robuustheid van een treindienstregeling met frequentieovergangen



Afstudeerscriptie

Janneke Tax
7 juli 2010

Vaker een trein, da's pas fijn!?

Onderzoek naar de robuustheid van een
treindienstregeling met frequentieovergangen

Afstudeerscriptie

Janneke Tax
7 juli 2010

Begeleiders:
ir. E.B. Nugteren, DHV
ir. T. Brands, Universiteit Twente
dr. J.C.W. van Ommeren, Universiteit Twente
prof. dr. ir. E.C. van Berkum, Universiteit Twente



DHV

UNIVERSITEIT TWENTE.

Universiteit Twente

Met dank aan:



NS Reizigers



Districon

VOORWOORD

Een half jaar geleden verhuisde ik naar Utrecht om daar de uitdaging van het afstuderen aan te gaan. Dat verhuizen was niets nieuws; het was de negende keer sinds de eerste keer naar Enschede. Wel nieuw was dat ik nu echt “aan het werk” zou gaan; veertig uur per week op mijn vaste flexplek zitten en mijn eigen onderzoek uitvoeren.

Dit onderzoek is nu afgerond en vormt daarmee ook het einde van mijn studie. Terwijl ik dit schrijf, kijk ik terug op zeven mooie jaren. Waarin ik niet alleen aan de UT gestudeerd heb, maar ook alle andere dingen heb kunnen doen die een studentenleven leuk en interessant maken.

Edo, bedankt voor je goede ideeën. Jouw input bracht me telkens weer stukken verder. Ik denk dat de andere treinreizigers blij zijn dat we niet meer samen naar Enschede hoeven te trainen.

Ties, Jan-Kees en Eric van Berkum, bedankt voor jullie begeleiding. Ik ging altijd weer vol goede moed en ideeën weg als ik op de UT was geweest.

David, mister OpenTrack, ook mij heb je besmet met het OpenTrack virus. Gelukkig stond je altijd open voor vragen. Alle andere collega's van Netwerkstudies en de unit Rail bedankt voor de fijne werkplek.

Leo Kroon (NS), je wilde me altijd helpen, ook als ik op het laatste moment met een vraag kwam. In september zullen we zien of de verschillen inderdaad zo klein zijn als mijn onderzoek aantoont.

Wouter Nering Bogel en Hans van Roest (Districon), bedankt voor jullie inzet bij de ontwikkeling van Geode. Ik hoop dat er nog veel uit voort komt.

Els, we gaan weer even ieder iets anders doen. Gelukkig kwamen onze wegen ook altijd weer samen. Ik ben benieuwd wanneer we solliciteren voor die duo-baan.

Jan, het zou echt saai geweest zijn zonder alle thee, verhalen en vooral mailtjes. F5.

Henri, ik weet het, niemand heeft gezegd dat afstuderen leuk is. Maar achteraf viel het allemaal best mee. En de twee vaatwassers zijn weer een stap dichterbij.

Roald, het moment dat ook jij je voorwoord schrijft, komt steeds dichterbij. Dat lijkt me een goed moment voor het viergangen diner.

Maria en Henny, bedankt voor jullie hulp, steun en vertrouwen. Telkens als ik met een nieuw plan thuis kwam, stonden jullie er achter.

Janneke
Utrecht, juli 2010

SAMENVATTING

Inleiding

De mobiliteit in Nederland neemt toe waardoor ook het aantal spoorkilometers voor zowel reizigers- als goederenvervoer zal stijgen. Om deze groei op te vangen moet op de lange termijn het spoor beter benut worden. In het kader hiervan is het Programma Hoogfrequent Spoorvervoer (PHS) opgestart (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, sd). In het PHS staat onder andere beschreven dat op de spoorverbindingen met de grootste vervoersstromen met hogere frequenties gereden moet worden.

In week 36 van 2009 is op de A2-corridor, tussen de stations Amsterdam Centraal en Eindhoven, een praktijkproef uitgevoerd met het rijden met hogere frequenties in de spits. Hieruit bleek dat het mogelijk is voor de spits op te schalen naar een 6-6 dienstregeling en na de spits weer terug te gaan naar de oorspronkelijke dienstregeling. 6-6 staat hierbij voor het laten rijden van zes intercity's en zes sprinters per uur. Het effect van het rijden met een hogere frequentie in de spits op de robuustheid van de dienstregeling is echter niet bekend, mede doordat tijdens de proefweek vrijwel geen verstoringen hebben plaatsgevonden. Ook in de literatuur is weinig bekend over de robuustheid van een dienstregeling met verschillende frequenties.

Bovenstaande problematiek leidt tot de volgende onderzoeksvraag:

In welke mate verandert de robuustheid van een treindienstregeling als in de spits met een hogere frequentie wordt gereden?

Deze vraag kan beantwoord worden aan de hand van een drietal deelvragen:

1. Hoe kan de robuustheid van een dienstregeling worden gekwantificeerd?
2. In hoeverre bestaat er een verschil in robuustheid tussen de standaarddienstregeling en de dienstregeling met hogere frequenties in de spits?
3. Welke van de twee dienstregelingen is robuuster?

Het onderzoek vindt plaats door het vergelijken van twee dienstregelingen, de standaarddienstregeling zoals gereden in 2009 en de 6-6 dienstregeling zoals gereden in week 36 van 2009, de hierboven genoemde proefweek. Beide dienstregelingen zijn onderzocht op de A2-corridor, de spoorverbinding tussen Amsterdam Centraal en Eindhoven.

Werkdefinitie voor robuustheid

In het onderzoek is, op basis van waarden uit de literatuur, een drietal waarden gekozen op basis waarvan de robuustheid van een dienstregeling kan worden vastgesteld. Dit zijn:

- Punctualiteit; het aantal treinen dat minder dan vijf minuten te laat op het station aankomt, gemeten over alle treinen en alle stations (anders dan de punctualiteit zoals gemeten door de NS);
- Netwerkstabiliteit; de som van de vertragingen van treinen die het netwerk uit rijden en hun dienst in het netwerk eindigen gedeeld door de som van de vertragingen van treinen die het netwerk binnen rijden en hun dienst in het netwerk starten; en
- Overstaphaalkans; de kans om een bepaalde overstap te halen.

Met deze drie waarden wordt zowel het aantal verstoringen op stationsniveau (punctualiteit) als de grootte van verstoringen (netwerkstabiliteit) en het effect van verstoringen op reizigers (overstaphaalkans) meegewogen in de beoordeling van een dienstregeling.

Opzet simulaties

Om de robuustheid van de standaarddienstregeling en de 6-6 dienstregeling te vergelijken zijn met behulp van het softwarepakket OpenTrack simulaties uitgevoerd. Op basis van realisatiedata van de treinenloop in de maand november 2009 zijn in de simulaties stochastische elementen (ingangsvertragingen en prestatieverdelingen van treinen) toegevoegd.

Per dienstregeling zijn zestig verschillende simulaties (scenario's) uitgevoerd die ieder een dag simuleren. Doordat voor beide dienstregelingen dezelfde random seeds gebruikt zijn, kunnen de simulaties paarsgewijs vergeleken worden. Daarnaast kunnen gemiddelden voor de beide dienstregelingen vergeleken worden.

Resultaten

Punctualiteit

In totaal blijken de verschillen in punctualiteit tussen de standaarddienstregeling en de 6-6 dienstregeling klein, met maximale verschillen van zo'n twee procentpunt. Op basis van vergelijking van waarden uit realisatiedata met die uit simulaties lijken de simulaties een goed beeld van de treinenloop te geven voor de gevallen waarin lichte verstoringen optreden.

Vergelijking van de 6-6 dienstregeling met de standaarddienstregeling levert geen significant verschil wanneer gemeten wordt op alle stations uit het model. De gemiddelde punctualiteit is met 91,81 % voor beide dienstregelingen gelijk. Hoewel een verschil verwacht wordt gezien het grotere aantal treinen in de 6-6 dienstregeling in vergelijking met de standaarddienstregeling, blijkt dit niet aantoonbaar. Dit komt waarschijnlijk doordat in de 6-6 dienstregeling langere rijtijden beschikbaar zijn bepaalde treinseries.

Wanneer alleen de hoofdstations (zoals gebruikt door de NS voor punctualiteitsbepalingen) in beschouwing worden genomen is een significant verschil tussen de dienstregelingen zichtbaar. Omdat op hoofdstations de intercity's zwaarder meewegen duidt dit erop dat deze een groter verschil in punctualiteit kennen.

Wanneer wordt gekeken naar verspreiding van vertraging over de corridor blijken de verschillen vooral tussen Utrecht en Eindhoven te liggen. Voor het traject tussen Utrecht en 's-Hertogenbosch wordt dit waarschijnlijk veroorzaakt doordat daar een relatief lang stuk dubbelspoor ligt (terwijl de rest van de corridor overwegend viersporig is). Daarnaast duidt het erop dat station 's-Hertogenbosch een knelpunt is, vooral voor treinen die in de richting van Amsterdam naar Eindhoven rijden.

Vergelijking van de 6-6 dienstregeling met de standaard dienstregeling voor alleen de spitsperiode geeft een vergelijkbaar beeld als vergelijking voor de gehele dag. Het meewegen van meer treinen en stations waar geen 6-6 wordt gereden zorgt dus dat er geen verschil zichtbaar is tussen de twee dienstregelingen. Dit lijkt erop te duiden dat een iets lagere punctualiteit van de 6-6 dienstregeling zich niet verder verspreid buiten de corridor. Bij vergelijking van alleen de intercity series die door de gehele corridor rijden (800, 10800 en 3500 series) blijkt er een verschil te bestaan tussen de twee dienstregelingen. Dit verschil is echter klein.

Netwerkstabiliteit

Beide dienstregelingen veroorzaken een stabiel netwerk. De waarde voor de netwerkstabiliteit is hoger bij de 6-6 dienstregeling dan bij de standaarddienstregeling. Dit blijkt zowel uit vergelijking van de gemiddelde waarden over alle simulaties als vergelijking van de twee waarden per scenario. Een hogere waarde voor de netwerkstabiliteit voor de 6-6 dienstregelingen betekent dat vertragingen die in deze dienstregeling het model binnen komen minder snel uitdempen dan vertragingen in de standaarddienstregeling.

Volgens de resultaten voor de punctualiteit is er weinig verschil tussen de twee onderzochte dienstregelingen. De resultaten voor de netwerkstabiliteit laten wel een verschil zien. Dit lijkt veroorzaakt te worden doordat een aantal vertraagde treinen in de 6-6 dienstregeling minder snel ruimte heeft om tussen de andere treinen door te gaan. Het aantal treinen waaraan de vertraagde trein zijn vertraging doorgeeft, is dan voor beide dienstregelingen wel nagenoeg gelijk. In de 6-6 dienstregeling is het hebben van vertraging voor een afzonderlijke trein dus ernstiger dan in de standaarddienstregeling, maar het doorgeven aan andere treinen is vergelijkbaar.

Overstaphaalkans

Voor het bepalen van de overstaphaalkans zijn er zeven overstaprelaties geselecteerd. Dit zijn alle relaties vanuit de A2-corridor waar een overstap plaatsvindt van een trein die zes keer per uur rijdt in de 6-6 dienstregeling op een trein die eens per half uur rijdt.

Op basis van de gemiddelde overstaphaalkans presteert de 6-6 dienstregeling voor drie relaties beter en de standaarddienstregeling voor vier relaties. Op basis van vergelijking per scenario blijkt een significant verschil bij vijf van de zeven relaties waarbij er twee beter presteren met de 6-6 dienstregeling en drie met de standaarddienstregeling. Op basis van deze resultaten kan niet geconcludeerd worden dat een van de twee dienstregelingen beter scoort voor de overstaphaalkans. Wel moet opgemerkt worden dat verschillen tussen de twee dienstregelingen niet alleen veroorzaakt worden door de uitvoer van de dienstregeling, maar ook het gevolg zijn van andere beschikbare overstaptijden.

Conclusies en aanbevelingen

Op basis van de resultaten kan gesteld worden dat de verschillen tussen de twee dienstregelingen klein zijn. De beantwoording van de hoofdvraag luidt dan ook als volgt: de robuustheid van een treindienstregeling vermindert als in de spits met een hogere frequentie wordt gereden. Deze vermindering is echter klein en niet op voor alle robuustheidsparameters aantoonbaar.

De aanbevelingen richten zich met name op verder onderzoek van de robuustheid wanneer aanpassingen worden gedaan aan de dienstregeling. Verbeteringen lijken onder andere mogelijk bij het inplannen van goederentreinen, plannen op seconden in plaats van minuten en invoeren van rijden op regelmaat in plaats van klokvast rijden. Andere aanbevelingen zijn dat het effect van de 6-6 dienstregeling op de reiziger verder onderzocht moet worden en dat uitbreiding van de capaciteit van met name de zuidzijde van station 's-Hertogenbosch de robuustheid van de treinenloop in het algemeen en die van de 6-6 dienstregeling in het bijzonder kan verbeteren.

SUMMARY

Introduction

Mobility in The Netherlands is increasing, so also the amount of train kilometers will increase for both travelers and freight. To keep track of the growth, the use of the railways should be better in the future. Therefore the Programma Hoogfrequent Spoorvervoer (PHS) has been introduced (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, sd). In the PHS it is stated that trains should run more frequently on highly used routes.

During week 36, 2009, on the A2-corridor, between Amsterdam Central station and Eindhoven station, a practical experiment has been conducted with running on higher frequencies during rush hours. This experiment shows that it is possible to increase frequencies before rush hour to a 6-6 schedule and decrease frequencies again after rush hour. A 6-6 schedule means running six intercity trains and six regional trains per hour. However the effect of a higher frequency during rush hour on the robustness of the train schedule is unknown, also due to the fact that during the experiment almost no delays occurred. Furthermore in literature little is known about the robustness of a train schedule with changing frequencies.

This results in the following research question:

To what extend does the robustness of a train schedule change when it is operated with a higher frequency during rush hours?

This question can be answered using three sub questions:

1. How can the robustness of a train schedule be quantified?
2. To what extend does a difference in robustness exist between the standard schedule and the schedule with higher frequencies during rush hour?
3. Which of the two schedules is more robust?

The research is conducted by comparing two schedules, the standard schedule as used in the year 2009 and the 6-6 schedule as used during the experiment of week 36, 2009. The research is done for the A2-corridor, the part of the Dutch railway network between Amsterdam Central station and Eindhoven station.

Working definition for robustness

During the research three values for robustness, based on literature, are chosen to represent robustness. These are:

- Punctuality; the number of trains that arrive less than five minutes late at the station, measured by all trains and on all stations (different from punctuality as measured by the Dutch Railways);
- Network stability; the sum of all delays from trains leaving the network and ending their service in the network divided by the sum of all trains entering the network and starting their service in the network.; and
- Probability of making a transfer.

These three values evaluate the schedule on the number of delays at station level (punctuality) as well as the size of delays (network stability) and the effect of delays on travelers (probability of making a transfer).

Simulation design

To compare robustness of the standard schedule with the 6-6 schedule, simulations with the tool OpenTrack have been conducted. Based on realization data of trains in November 2009 stochastic elements (entrance delays and performance distributions) are added to the simulation.

Per train schedule sixty different simulations ("scenarios") are conducted, all representing a day. By using the same random seeds for both schedules it is possible to compare the simulations pairs wise. Next to that mean values for both schedules can be compared.

Results

Punctuality

In total the differences in punctuality between the standard schedule and the 6-6 schedule turn out to be small, with maximal differences of about two percentage points. Based on the comparison between values from realization data and simulation data, the simulations seem to give a good representation of lightly disturbed train running behavior.

Comparison of the 6-6 schedule with the standard schedule does not show significant differences while measured on all stations in the model. The mean punctuality is 91.81 % for both schedules. Although a difference could be expected based on the higher number of trains running in the 6-6 schedule compared to the standard schedule, this can not be shown. This is probably due to the fact that in the 6-6 schedule longer running times are available for some train series.

When only important stations (as used for punctuality measures by the Dutch railways) are taken into account a significant difference between the schedules can be shown. Because intercity trains are weighted more heavily on the important stations, it is pointed out that intercity trains will know a bigger difference in punctuality.

When considering the spatial distribution of delays on the corridor it shows that the differences are biggest between Utrecht and Eindhoven. On the part between Utrecht and 's-Hertogenbosch this is probably due to the fact that the railway has a relative long part which is double-track (instead of four-track lines on most other parts of the corridor). Next to that it indicates 's-Hertogenbosch station as a bottleneck, especially for trains driving from Amsterdam in direction of Eindhoven.

Comparison of the 6-6 schedule with the standard schedule for rush hours only gives comparable results as comparison for the whole day. So taking into account more trains and more stations where no trains run 6-6 makes the difference between the schedules non-significant. This seems to show that a little lower punctuality of the 6-6 schedule does not spread further outside the corridor. By comparing only the intercity train series which run through the whole corridor (series 80, 10800 and 3500) a difference between the two schedules can be shown. However, this difference is small.

Network stability

Both schedules result in a stable network. The value for the network stability is higher for the 6-6 schedule than for the standard schedule. This is shown both by comparing mean values for all simulations as comparison of values per scenario. A higher value for the network stability of the 6-6 schedule means that delays which enter the model decrease slower than delays in the standard schedule.

According to the results for punctuality there is little difference between the two evaluated schedules. However the results for network stability show such a difference. This seems to be due to fewer possibilities in the 6-6 schedule for a delayed train to fit in the schedule between other trains. The amount of knock-on delays in both schedules is almost the same, while the size of the delay for the individual train is longer.

Probability of making a transfer

To derive the probability of making a transfer seven transfers have been selected. These are all transfers from a six times per hour driving train in the 6-6 schedule on the A2-corridor to a train driving once per half an hour.

Based on the mean probability of making a transfer the 6-6 schedule shows better results for three relations and the standard schedule for four. Based on the comparison per scenario a significant difference is shown for five out of seven relations, where two show better results for the 6-6 schedule and three for the standard schedule. Based on these results no conclusion can be drawn on a higher probability of making a transfer for one of the schedules. It should be said that differences between the two schedules are not only caused by running of the schedule but also by other available changing times.

Conclusions and recommendations

The results show only little differences between the two schedules. This gives the following answer for the research question: the robustness of a train schedule decreases when it is operated with a higher frequency during rush hour. However this difference is small and can not be shown for all values of robustness.

The recommendations mostly focus on further research of robustness when the train schedule changes. Improvement seems among other things possible while scheduling freight trains differently, scheduling on seconds in stead of minutes and driving based on regularity instead of fixed times. Other recommendations are the need for further research on the effect of a 6-6 schedule for the traveler, and the possibility of improving the robustness of train schedules and the 6-6 schedule in particular by increasing the capacity of 's-Hertogenbosch station and especially the south side of this station.

INHOUD

1	INLEIDING	1
1.1	Achtergrond	1
1.2	Vraagstelling	2
1.3	Afbakening	3
1.4	Leeswijzer	4
2	SPOORVERVOER	5
2.1	Infrastructuur: spoorwegennet	5
2.2	Dienst: treindiensten en dienstregeling	6
2.3	Verstoringen	10
3	ROBUUSTHEID VAN EEN DIENSTREGELING	13
3.1	Definities voor kwaliteit van een dienstregeling uit literatuur	13
3.2	Werkdefinitie voor robuustheid in het onderzoek	14
4	EVALUATIE VAN EEN DIENSTREGELING	17
4.1	Methoden voor evaluatie van een dienstregeling	17
4.2	Simulatie als evaluatiemethode	17
4.3	Simulatiesoftware: OpenTrack	19
5	OPZET SIMULATIES	25
5.1	Dienstregelingen	25
5.2	Stochastische elementen uit realisatiecijfers	28
5.3	Infrastructuur	29
5.4	Parameters simulaties	30
6	PUNCTUALITEIT	33
6.1	Bepaling punctualiteit	33
6.2	Gemiddelde punctualiteit	34
6.3	Vergelijking punctualiteitscijfers met realisatiedata	34
6.4	Vergelijking punctualiteit per scenario	35
6.5	Spreiding van punctualiteit over de A2-corridor	36
6.6	Punctualiteit op hoofdstations	38
6.7	Punctualiteit tijdens de spits	39
6.8	Punctualiteit van 800, 10800 en 3500 serie	41
6.9	Grens voor punctuele trein bij drie minuten	42
6.10	Conclusies resultaten punctualiteit	44
7	NETWERKSTABILITEIT	47
7.1	Bepaling netwerkstabiliteit	47
7.2	Gemiddelde netwerkstabiliteit	48
7.3	Vergelijking netwerkstabiliteit per scenario	48
7.4	Conclusie resultaten netwerkstabiliteit	49
8	OVERSTAPHAALKANS	53
8.1	Bepaling overstaphaalkans	53
8.2	Gemiddelde overstaphaalkans	55

8.3	Vergelijking overstaphaalkans per scenario	56
8.4	Conclusie resultaten overstaphaalkans	56
9	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN.....	57
9.1	Conclusies.....	57
9.2	Aanbevelingen.....	58
10	BRONVERMELDING.....	61
	BIJLAGE 1: "STUDIEGEBIED".....	I
	BIJLAGE 2: "VOORBEELD BUP EN BSO"	III
	BIJLAGE 3: "HOOFDSPOORNET"	V
	BIJLAGE 4: "TREIN SERIES".....	VII
	BIJLAGE 5: "TIJD-WEG DIAGRAM UIT OPENTRACK"	IX
	BIJLAGE 6: "OVERZICHT GOEDERENPADEN"	XI
	BIJLAGE 7: "OPTIMALISATIE TREINENLOOP IN OPENTRACK"	XIII
	BIJLAGE 8: "BEPALING VERDELINGEN UIT REALISATIEDATA"	XVII
	BIJLAGE 9: "RESULTATEN PER SCENARIO".....	XXI
	BIJLAGE 10: "BOXPLOTS RESULTAATWAARDEN"	XXV
	BIJLAGE 11: "SIGNIFICANTIEWAARDEN STATISTISCHE TESTS PUNCTUALITEIT"	XXVII

1 INLEIDING

Als de reiziger zou mogen kiezen, was het duidelijk: als hij het perron op loopt, komt de trein precies binnen rijden. Deze trein brengt hem met een directe verbinding naar zijn bestemming. Overstappen zou niet hoeven en vertragingen zouden niet voorkomen.

Helaas voor de reiziger is deze ideale situatie niet uitvoerbaar. De trein is een vorm van collectief vervoer, dus een groot aantal reizigers zal er tegelijk gebruik van moeten maken. Om dit uitvoerbaar te maken, is er een dienstregeling ingesteld. Het aanpassen en verbeteren van deze dienstregeling is een proces waar continu aan gewerkt wordt. Dit verslag beschrijft een deel van dit onderzoek, gericht op de robuustheid van een dienstregeling met frequentieovergangen.

1.1 Achtergrond

De mobiliteit in Nederland neemt toe, waardoor ook het aantal spoorkilometers voor zowel reizigers- als goederenvervoer zal stijgen. Dit terwijl het spoorwegennet van Nederland al behoort tot de drukst bereden netten in de wereld, met meer dan 75 treinkilometers per kilometer rail per etmaal (ProRail, 2009). Voor het personenvervoer per spoor wordt uitgegaan van een groei naar 18 tot 23 miljard reizigerskilometers in 2020. De groeiverwachting van het goederenvervoer per spoor is eveneens hoog. In 2020 is de prognose dat tussen de 80 en 90 miljoen ton goederen via het spoor hun bestemming bereiken (ProRail, 2008a). Ter vergelijking: in 2000, het referentiejaar voor de Nota Mobiliteit, was het aantal reizigerskilometers 14 miljard en werd er 28 miljoen ton goederen vervoerd (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2004).

1.1.1 Programma Hoogfrequent Spoorvervoer

Om de groei op te vangen, moet op de lange termijn het spoor beter benut worden. In het kader hiervan is het Programma Hoogfrequent Spoorvervoer (PHS) opgestart (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, sd). Doel hiervan is om de volgende punten te realiseren:

- 'Hoogfrequent Spoorvervoer' op de spoorverbindingen met de grootste vervoersstromen; en
- Het verwerken van het groeiende goederenvervoer.

Hierbij staat 'Hoogfrequent Spoorvervoer' voor het laten rijden van minimaal zes intercity's per uur, aangevuld met sprinters die de tussenliggende stations bedienen. Het PHS wordt uitgevoerd in een samenwerking tussen de overheid, de railinframanager en de vervoerders (zie 1.1.2).

1.1.2 Organisatie van spoorvervoer in Nederland

Op het Nederlandse spoorwegennet zijn drie typen actoren actief, namelijk de overheid, de railinframanager en de vervoerders. De overheid verleent de vervoers- en beheersconcessie en maakt de wet- en regelgeving. De railinframanager, ProRail, is verantwoordelijk voor aanleg, onderhoud, beheer en veiligheid van het spoorwegennet. De vervoerders regelen de exploitatie van de treindiensten.

Binnen de vervoerders wordt onderscheid gemaakt in reizigersvervoer en goederenvervoer. Op het gebied van het reizigersvervoer is NS Reizigers de grootste speler. Op een aantal regionale lijnen wordt het reizigersvervoer verzorgd door andere vervoerders zoals Connexxion, Veolia en Arriva. Het goederenvervoer wordt verzorgd door een groot aantal bedrijven, die zijn verenigd in KNV Goederenvervoer.

1.2 Vraagstelling

In het PHS staat onder andere beschreven dat op de spoorverbindingen met de grootste vervoersstromen met hogere frequenties gereden moet worden. In week 36 van 2009 is op de A2-corridor, tussen Amsterdam Centraal en Eindhoven, een praktijkproef uitgevoerd met het rijden met hogere frequenties in de spits. Hieruit bleek dat het mogelijk is voor de spits op te schalen naar een 6-6 dienstregeling en na de spits weer terug te gaan naar de oorspronkelijke dienstregeling. 6-6 staat hierbij voor het laten rijden van zes intercity's en zes sprinters per uur (zie voor verdere uitleg 2.2.3). Het effect van het rijden met een hogere frequentie in de spits op de robuustheid van de dienstregeling is echter niet bekend, mede doordat tijdens de proefweek vrijwel geen verstoringen hebben plaatsgevonden. Ook in de literatuur is weinig bekend over de robuustheid van een dienstregeling met verschillende frequenties. De verwachting is dat verhoging van de frequentie een verlaging van de robuustheid van de dienstregeling tot gevolg heeft, waardoor de kwaliteit van de treinenloop vermindert.

Bovenstaande problematiek leidt tot de volgende onderzoeksvraag:

In welke mate verandert de robuustheid van een treindienstregeling als in de spits met een hogere frequentie wordt gereden?

Deze vraag kan beantwoord worden aan de hand van een drietal deelvragen:

1. Hoe kan de robuustheid van een dienstregeling worden gekwantificeerd?
2. In hoeverre bestaat er een verschil in robuustheid tussen de standaarddienstregeling en de dienstregeling met hogere frequenties in de spits?
3. Welke van de twee dienstregelingen is robuuster?

De eerste vraag gaat in op de term robuustheid. Deze term is in het algemeen niet eenduidig gedefinieerd, daarom moet voor het onderzoek een aantal eenheden voor robuustheid worden vastgesteld. Deze eenheden bepalen samen de robuustheid van een dienstregeling. De tweede vraag gaat in op mogelijke verschillen tussen dienstregelingen, waarbij de eenheden van robuustheid afzonderlijk behandeld worden. De derde vraag geeft een vergelijking van de twee dienstregelingen op het gebied van robuustheid, wanneer de resultaten voor alle eenheden worden meegenomen.

1.3 Afbakening

Voor de afbakening van het onderzoek wordt hieronder een aantal inperkingen, aannames en uitgangspunten gegeven.

Studiegebied

De simulaties zullen plaatsvinden op de A2-corridor, op het traject Amsterdam – Eindhoven, waar in week 36 van 2009 de proef met 6-6 rijden in de spits is uitgevoerd. Alle treinseries die op de corridor rijden, zullen in het onderzoek worden meegenomen. Een deel van de treinen rijdt niet het volledige traject tussen Amsterdam en Eindhoven, maar takt later aan of af. Deze aan- en aftakkingen worden in de simulaties meegenomen respectievelijk vanaf en tot het eerste station op de aan- en aftakkingen.

De A2-corridor is een van de drie trajecten waarop rijden met de 6-6 dienstregeling volgens het PHS zal worden ingevoerd. Dit traject is representatief voor een druk traject in Nederland, dus de verwachting is dat wanneer een dienstregeling met overgangen op dit traject goed functioneert, de kans groot is dat dit ook zo is op de andere trajecten uit het PHS waar 6-6 gereden gaat worden. Hierbij moet wel opgemerkt worden dat op de andere trajecten knelpunten in de infrastructuur voor kunnen komen, die opgeheven moeten worden om 6-6 rijden mogelijk te maken.

In Bijlage 1: “Studiegebied” is een overzicht gegeven van de stations die in het studiegebied vallen, opgedeeld naar stations op de corridor zelf en stations op aan- en aftakkingen. Daarnaast is in deze bijlage een schematisch overzicht van de A2-corridor gegeven.

Personeel

De omloop van personeel wordt niet meegenomen in het onderzoek. Er wordt vanuit gegaan dat altijd voldoende personeel aanwezig zal zijn om de dienstregeling uit te voeren. Aangezien een treindienst altijd in twee richtingen opereert, zal dit in werkelijkheid geen grote problemen opleveren. Personeel dat bij zijn eindpunt aankomt, zou enige tijd later weer ingezet kunnen worden in de omgekeerde richting.

Materieel

Wat betreft het materieel wordt er vanuit gegaan dat er voldoende materieel van het juiste type beschikbaar is voor het uitvoeren van de dienstregeling. Er zal wel rekening worden gehouden met de materieelomloop voor de lijnen die binnen het model eindigen. Materieel zal dan gekoppeld worden aan de volgende dienst die het gaat rijden.

Infrastructuur

Er wordt uitgegaan van de infrastructuur zoals die beschikbaar was in 2009, omdat op die infrastructuur de praktijkproef in week 36 is uitgevoerd. Wanneer hierin grote knelpunten blijken te bestaan, worden deze benoemd.

Dienstregeling

Voor de standaard dienstregeling wordt uitgegaan van de dienstregeling 2009. Voor de dienstregeling met 6-6 in de spits wordt de dienstregeling zoals deze gereden is tijdens de proef van week 36 van 2009 als uitgangspunt genomen. Deze wordt verder 6-6 dienstregeling genoemd. Het ontwerpen van een nieuwe dienstregeling valt niet binnen de scope van het onderzoek.

Calamiteiten

Het gevolg voor de dienstregeling van ernstige verstoringen, ofwel calamiteiten, zullen niet in het onderzoek worden meegenomen. Volgens de definitie van ProRail is er sprake van een calamiteit als de treindienst op een traject langer dan een half uur verstoord is en treinen daarbij vijf minuten of meer vertraging oplopen (ProRail, sd). Hierbij kan bijvoorbeeld gedacht worden aan een defecte trein op het spoor, een aanrijding, een wisselstoring etc. Bij het oplossen van calamiteiten zullen altijd vergaande aanpassingen aan de dienstregeling moeten worden gedaan; deze zijn afhankelijk van de calamiteit en kunnen dus niet in de standaard dienstregeling worden opgenomen.

Reizigers

Het aantal reizigers dat gebruik maakt van de trein in het studiegebied wordt als constant beschouwd. Het effect dat de dienstregeling heeft op de vervoersvraag van de reizigers wordt in dit onderzoek dus niet meegenomen.

1.4 Leeswijzer

In dit verslag wordt eerst de achtergrond van het spoorvervoer in Nederland besproken, waarbij zowel de infrastructuur als treindiensten aan bod komen, met uitleg over het specifieke geval van de 6-6 dienstregeling (hoofdstuk 2). In dit hoofdstuk wordt ook aandacht besteed aan verstoringen die kunnen optreden bij het uitvoeren van een dienstregeling. Hoofdstuk 3 richt zich op de robuustheid van dienstregelingen. Vervolgens wordt aandacht besteed aan evaluatiemethoden van een dienstregeling in het algemeen en simulatie in het bijzonder (hoofdstuk 4) en wordt de opzet van de gebruikte simulaties beschreven (hoofdstuk 5). In hoofdstuk 6 tot en met 8 worden vervolgens de resultaten van het onderzoek besproken, die leiden tot de conclusies en aanbevelingen in hoofdstuk 9.

2 SPOORVERVOER

Zoals blijkt uit de organisatiestructuur (zie 1.1), kan bij het spoorvervoer onderscheid worden gemaakt tussen infrastructuur en treindiensten. In dit hoofdstuk wordt een aantal karakteristieken van zowel de infrastructuur als de treindiensten besproken. Daarna wordt aandacht besteed aan verstoringen, die tot gevolg kunnen hebben dat de treindiensten niet uitgevoerd worden zoals ze gepland zijn.

2.1 Infrastructuur: spoorwegennet

Hieronder wordt eerst de opbouw van het Nederlandse spoorwegennet besproken worden. Vervolgens wordt speciale aandacht besteed aan het beveiligingssysteem. Dit speelt in grote rol in de manier waarop treinen rijden.

2.1.1 Opbouw

Het Nederlandse spoorwegennet is een aaneenschakeling van punten, de stations, met daartussen spoorlijnen, de baanvakken. De meeste baanvakken zijn uitgevoerd met dubbel spoor. Op enkele trajecten, voornamelijk in de Randstad, zijn er vier sporen. Dit aantal wordt verder uitgebreid, ter verhoging van de capaciteit van het spoorwegennet. Een aantal regionale lijnen is enkelsporig.

Het spoorwegennet is opgedeeld in blokken, een stuk rails tussen twee seinen. Deze hebben een lengte van een paar honderd meter tot enkele kilometers. In de stations zijn de blokken kort, op de vrije baan zijn deze langer.

In Nederland rijden treinen normaal gesproken rechts, zoals op autowegen. Alleen op bepaalde trajecten, voornamelijk als er enkel spoor ligt, rijden treinen in tegengestelde richtingen over hetzelfde spoor. Daarnaast wordt in het geval van calamiteiten links gereden zodat de treindienst (deels) in stand gehouden kan worden. Om dit mogelijk te maken, is het beveiligingssysteem (zie 2.1.2) in de meeste gevallen in beide richtingen uitgevoerd.

2.1.2 Beveiliging

Vanwege de veiligheid mag in een blok slechts één trein tegelijk aanwezig zijn. De volgende trein mag dus pas een blok inrijden als de vorige trein dit verlaten heeft. Door middel van seinen langs het spoor wordt aan de machinist aangegeven of deze mag doorrijden of moet afremmen en eventueel stoppen.

De belangrijkste seinbeelden zijn rood, geel en groen. Voor een rood sein moet een machinist wachten, een groen sein betekent dat hij mag doorrijden met de ter plekke geldende snelheid. Een geel sein is een waarschuwing voor de machinist dat het volgende sein rood is. Hij moet dan zijn snelheid verminderen tot 40 km/uur, zodat de trein op tijd stil kan staan voor het komende rode sein. Ieder rood sein wordt vooraf gegaan door een geel sein.

De snelheid die in een bepaald baanvak gereden mag worden, is aangegeven met snelheidsborden. De baanvakssnelheid op de vrije baan varieert in Nederland tussen 80 en 140 km/uur. Bij bijvoorbeeld stations en emplacementen is de maximale snelheid vaak lager. Langs het spoor staan snelheidsborden die aangeven met welke snelheid op het baanvak gereden mag worden.

De seinen kunnen, in aanvulling op de borden, verdere snelheidsbeperkingen aangeven. Dit gebeurt bijvoorbeeld wanneer een wissel, als deze in de afbuigende stand bereden wordt, met een lagere snelheid gepasseerd moet worden dan de baanvakssnelheid aangeeft.

2.2 Dienst: treindiensten en dienstregeling

De dienst die op het spoorwegennet wordt aangeboden, bestaat uit het laten rijden van treinen, volgens een van te voren vastgestelde dienstregeling. Hieronder wordt eerst aandacht besteed aan de verschillende treindiensten die rijden. Daarna wordt de opbouw van de dienstregeling behandeld, met speciale aandacht voor de 6-6 dienstregeling.

2.2.1 Treindiensten

De treindiensten op het Nederlandse spoorwegennet zijn heterogeen. Dit betekent dat er verschillende typen treinen rijden. Het verschil wordt vooral bepaald door het product dat vervoerd wordt (reizigers of goederen), het aantal stations dat wordt aangedaan, de snelheid waarmee gereden wordt en de afstand tussen herkomst en bestemming. Ter vergelijking, bij homogene treindiensten rijden alle treinen op een bepaalde verbinding met dezelfde karakteristieken en stoppen op dezelfde stations, zoals het geval is bij onder andere een metronet.

In de Nederlandse dienstregeling zijn standaard vier typen treinen ingepland:

- Hogesnelheidstreinen (HST): internationale passagierstreinen die grote steden verbinden;
- Intercity's (IC): lange-afstands passagierstreinen die alleen stoppen bij grotere stations;
- Sprinters (op sommige trajecten stoptreinen¹): lokale passagierstreinen die alle stations op hun route bedienen; en
- Goederentreinen.

In de Nederlandse stations is een hiërarchie, die bepaalt welk type trein er stopt. De stations waar hogesnelheidstreinen stoppen, zijn een deelverzameling van stations waar intercity's stoppen en deze zijn weer een deelverzameling van de stations waar sprinters stoppen. Het idee hierachter is dat er geen stations zijn waar bijvoorbeeld wel intercity's stoppen, maar geen sprinters. Aan het einde van treinlijnen wordt hier op sommige plaatsen van afgeweken; dan stopt de intercity op een aantal kleinere stations bij wijze van sprinter.

¹ Het verschil tussen sprinters en stoptreinen is voornamelijk een kwestie van marketing; voor de dienstregeling zijn de verschillen minimaal. In het vervolg zal voor beide typen de term sprinter worden gebruikt.

2.2.2 Dienstregeling

De treinen op het spoorwegennet rijden volgens een van te voren opgestelde dienstregeling. Deze bestaat uit een “programma” dat aangeeft hoe treinen door Nederland rijden. De dienstregeling wordt opgesteld door de NS, in samenspraak met ProRail, de goederenvervoerders en belangenorganisaties.

De eerste stap in het maken van een dienstregeling bestaat uit het bepalen van de herkomsten en bestemmingen waartussen treinen gaan rijden. Vervolgens worden de routes tussen deze herkomsten en bestemmingen bepaald, samen met eventuele tussenstations. Hierna wordt het type treindienst vastgesteld, met een frequentie waarmee deze moet gaan rijden. Het gevolg hiervan is een treinlijn, bestaande uit een treindienst die wordt gekarakteriseerd door een route tussen een herkomst en een bestemming, de stations waar de trein moet stoppen en de frequentie waarmee gereden wordt. De verzameling van treinlijnen vormt samen de lijnvoering.

Vervolgens wordt voor iedere treinlijn een haalbare planning van aankomst- en vertrektijden bij de opeenvolgende stations gemaakt (Goverde, 2005). De basis hiervoor is de rijtijd, de tijd die een trein er over doet om een bepaald traject af te leggen. De rijtijd is een theoretisch getal, dat wordt bepaald aan de hand van de plannormen. Dit is in tegenstelling tot de rijtijd zoals die gebruikt wordt bij tram en bus, waar deze afgeleid wordt uit de realisatie van het vorige jaar.

Bij het vaststellen van de rijtijd wordt onder andere rekening gehouden met (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2006):

- De baanvaksnelheid;
- De minimale tijdsafstand tussen twee treinen op een baanvak;
- De trein-rijkaracteristieken (maximumsnelheid, optrek- en aftremtijd); en
- De halteertijd (afhankelijk van het stations- en treintype en de aantallen in- en uitstappers).

Deze zaken geven opgeteld de minimale rijtijd van station A naar station B. Daar bovenop is een zeker speling nodig, omdat er gedurende een treinrit allerlei zaken kunnen voorkomen die afwijking van de gestelde “ideale” tijdnorm veroorzaken. De minimale rijtijd plus de marge geeft de plannorm. Tot voor kort was de speling standaard een vast percentage van vijf of zeven procent van de minimale rijtijd. Om beter benutting van het spoor mogelijk te maken, is afgesproken om de speling slimmer in te plannen. Dit betekent dat niet meer een vast percentage gebruikt wordt, maar extra speling bij een knelpunt en minder speling op plekken waar meer ruimte is (ProRail, 2008).

2.2.2.1 Cycliciteit van de dienstregeling

Zoals de meeste dienstregelingen in Europa is de dienstregeling in Nederland periodiek. Dit betekent dat iedere tijdsperiode T hetzelfde treinpatroon wordt herhaald. In Nederland is de periode T bepaald op zestig minuten ofwel een uur; het herhaalpatroon wordt dan ook Basis Uur Patroon (BUP) genoemd. Dit heeft ook tot gevolg dat de planning van de aankomende en vertrekkende treinen op een station ieder uur hetzelfde is.

Het BUP kan grafisch weergegeven worden door een tijd-wegdiagram. Hierin zijn de verschillende treinseries (zie 2.2.2.2) die op een bepaald traject rijden weergegeven. In Bijlage 2: "Voorbeeld BUP en BSO" is in Figuur B.3. een voorbeeld van een BUP gegeven voor de avondspitsdienstregeling 2009 op het traject tussen Amsterdam Centraal (Asd) en Utrecht Centraal (Ut). De spooropstelling in de stations is vastgesteld in de Basis Spoor Opstelling (BSO). In Bijlage 2: "Voorbeeld BUP en BSO" is in Figuur B.3 hiervan een voorbeeld weergegeven voor het station Amsterdam Centraal. Per spoor is aangegeven op welke tijdstippen het bezet is door welke treinserie.

Een voordeel van een cyclische dienstregeling is dat passagiers eenvoudig de vertrek- en aankomsttijden van treinen kunnen onthouden. Daarnaast is het relatief eenvoudig om een groot aantal overstapmogelijkheden te creëren. Nadeel is dat er relatief weinig directe verbindingen zijn. Een ander nadeel is dat een cyclische dienstregeling inefficiënt is, omdat de vervoersvraag varieert over de dag. Dit wordt vaak opgelost door in de daluren een aantal treinen niet te laten rijden en treinen in de spits tussen te voegen, de zogenaamde spitstoevoegers (Kroon et al., 2008).

Het goederenvervoer is ook cyclisch ingepland in de dienstregeling. Ieder uur is op hetzelfde moment ruimte beschikbaar voor het rijden van goederentreinen, de zogenaamde goederenpaden. Niet alle paden kunnen gelijktijdig worden gebruikt, omdat paden ingepland zijn met een (deels) overlappend traject. Daarnaast worden niet alle beschikbare goederenpaden benut; de goederenvervoerders kunnen tot 36 uur van te voren een aanvraag indienen om gebruik te mogen maken van een goederenpad.

2.2.2.2 Nummering treinen

De cycliciteit van de dienstregeling komt terug in de nummering van de treinen. Voor passagierstreinen bestaat een treinserie uit dezelfde type treinen (dus IC of Sprinter) met dezelfde herkomst, bestemming en tussenstops en een bepaalde frequentie. Bijvoorbeeld, de 3500 serie bestaat uit de IC's die rijden tussen Schiphol en Eindhoven. Het tiental wordt vervolgens gedurende de dag ingevuld, de eerste trein van de dag van Schiphol naar Eindhoven heet 3519, de volgende trein 3521, etc. Er wordt altijd zo genummerd dat een trein twee keer per uur kan rijden. Wanneer de frequentie lager is, worden nummers overgeslagen, wanneer de frequentie hoger is wordt een aparte treinserie toegevoerd. In het algemeen zijn de even nummers voor de treinen naar Amsterdam toe en de oneven nummers voor de treinen van Amsterdam vandaan. In Bijlage 4: "Treinseries" is een overzicht gegeven van alle treinseries die door de A2-corridor rijden. In totaal rijden er op een dag in de standaarddienstregeling 1275 treinen door de corridor, met de 6-6 dienstregeling zijn dit er 1326.

De nummering van de goederentreinen is minder strak gedefinieerd en varieert daardoor per publicatie. Als uitgangspunt voor de studie is de nummering aangehouden zoals gebruikt in BUP's van ProRail en NS Reizigers. Deze nummers zijn van de vorm [herkomst][bestemming][nummer][S/SD/D].[volnummer]. Het nummer staat voor bepaalde eigenschappen van het materieel waarmee gereden wordt. De letters S, SD en D geven aan of het een treinserie betreft die in de spits (S), het dal (D) of spits en dal (SD) rijdt. Het volnummer geeft aan de hoeveelste trein van de dag het betreft. De nummering is per uur, dus het eerste uur heeft nummer een, het tweede uur nummer twee, etc.

2.2.3 6-6-2 dienstregeling

In het PHS (zie 1.1.1) is beschreven dat op een aantal trajecten in de Randstad gereden moet gaan worden met een 6-6 dienstregeling (ook 6-6-2 dienstregeling genoemd). Het betreft de corridors Amsterdam – Eindhoven (A2-corridor), Schiphol – Arnhem (Rhijnspoorlijn) en Den Haag – Rotterdam (Oude Lijn) (ProRail, 2008b). Op dit moment wordt op deze trajecten in de Randstad gereden met een frequentie van vier intercity's en twee of vier sprinters per uur.

Een 6-6 dienstregeling houdt in dat op een bepaalde corridor zes intercity's en zes sprinters per uur rijden. Daarnaast zijn er twee goederenpaden per uur. Doordat de corridors Amsterdam – Eindhoven en Schiphol – Arnhem overlappen tussen Amsterdam Bijlmer en Utrecht Centraal, zal daar zelfs met twaalf intercity's en twaalf sprinters per uur gereden gaan worden, in vergelijking met acht intercity's en vier tot acht sprinters nu. Dit is mogelijk doordat het traject viersporig is, zodat intercity's en sprinters gescheiden sporen hebben.

Gezien de hogere vervoersvraag in de spits en de lagere vervoersvraag in de daluren, is het waarschijnlijk alleen in de spits rendabel om de 6-6 dienstregeling uit te voeren. Dit betekent dat vlak voor of aan het begin van de spits de frequentie verhoogd moet worden en dat aan het einde van de spits of vlak erna weer uitgedund moet worden. In Tabel 1 is weergegeven welke volgnummers in de spits vallen, wanneer gereden wordt met een hogere frequentie in de spits.

Ochtendspits		Avondspits	
Even	Oneven	Even	Oneven
14	15	54	55
16	17	56	57
⋮	⋮	⋮	⋮
26	27	62	63
28	29	64	65

Tabel 1: Volgnummers spitsreinen

De overgang tussen een 4-4 dienstregeling en een 6-6 dienstregeling betekent dat er per treindienst een overgang moet plaatsvinden tussen een trein per kwartier (15' ligging) en een trein per tien minuten (10' ligging). Om de treinen evenredig verdeeld te houden per uur, is alleen het toevoegen van twee treinen per dienst niet voldoende. Er zullen ook minimaal twee van de vier oorspronkelijke treinen verschoven moeten worden. Dit is geïllustreerd met een voorbeeld in Tabel 2. Deze verschuiving van treinen betekent dat er een overgang van het ene BUP op het andere moet plaatsvinden. Dit is in tegenstelling tot de huidige dienstregeling, die voor het hele etmaal op één BUP gebaseerd is. Een dienstregeling met overgangen tussen BUP's is dus niet meer volledig cyclisch.

15' ligging	10' ligging	Gewijzigde vertrektijd
.05	.05	Nee
.20	.15	Ja
-	.25	Ja
.35	.35	Nee
.50	.45	Ja
-	.55	Ja

Tabel 2: verschillende vertrektijden bij een 15' ligging en een 10' ligging

2.2.3.1 Proef: 6-6 dienstregeling op de A2-corridor

In week 36 van 2009 (31 augustus tot 4 september) hebben NS Reizigers, Koninklijk Nederlands Vervoer en ProRail een proef met de 6-6 dienstregeling uitgevoerd op de A2-corridor. Tijdens de spits is er op het traject Amsterdam – Eindhoven gereden met zes intercity's per uur en op het traject Utrecht Centraal – Geldermalsen met zes sprinters per uur. Bovendien was er ruimte ingepland voor twee goederenpaden per uur.

Uit de evaluatie van deze week (NS Reizigers, 2009) is gebleken dat het rijden van een 6-6 dienstregeling in de spits met de gerealiseerde scherpe uitvoering en het uitblijven van incidenten betrouwbaar uit te voeren was. Een regelmatige cadans is goed vastgehouden; het aantal treinen van een treinserie dat met een gelijke tussentijd van zijn beginstation vertrok was hoger dan 90,5 %. Tegelijk is een hoge punctualiteit mogelijk gebleken, met slechts enkele opgeheven treinen (0,02 % vs 1,4 % in de standaard-dienstregeling). Het terugschalen van 6-6 naar 4-4 na de ochtendspits, het opschalen van 4-4 naar 6-6 in de middagspits en vervolgens weer het terugschalen naar 4-4 zijn qua planning en uitvoering probleemloos verlopen.

In deze evaluatie wordt echter benadrukt dat de goede uitvoering mede mogelijk was dankzij de focus op de proef, de scherpste van het personeel en het uitblijven van incidenten. Wanneer de 6-6 dienstregeling standaard wordt ingevoerd in de spits, zal dit deel gaan uitmaken van "de orde van de dag", waardoor de scherpste van bijsturing en personeel waarschijnlijk weer naar een normaal niveau zullen gaan. Daarnaast zullen ook kleinere en grotere verstoringen gaan optreden, die in de proefweek zijn uitgebleven.

2.3 Verstoringen

In de voorgaande paragrafen is beschreven hoe treinen gepland zijn op de beschikbare infrastructuur. In de praktijk wordt deze planning zo goed mogelijk uitgevoerd. Het blijkt echter dat niet altijd aan de planning voldaan kan worden. Dit kan het gevolg zijn van zeer verschillende oorzaken, variërend van bijvoorbeeld veel in- en uitstappende reizigers tot een boom die over een aantal sporen is gevallen. De gevolgen hiervan zijn ook zeer divers, van een paar seconden te laat vertrekken op een station tot volledig buiten gebruik zijn van een traject.

Er kan onderscheid gemaakt worden tussen primaire en secundaire verstoringen (Vromans, 2004). Primaire verstoringen worden veroorzaakt door de trein zelf of externe factoren en niet door andere treinen. Secundaire verstoringen ontstaan door vertraging van andere treinen. Deze zijn dus het gevolg van doorgeven van verstoringen op andere treinen. Hieronder zal eerst een aantal redenen voor beide typen verstoringen gegeven worden. Vervolgens wordt de grootte en verdeling van verstoringen besproken.

2.3.1 Redenen voor verstoringen

Voor het ontstaan van verstoringen is een oneindig aantal oorzaken mogelijk. Deze oorzaken kunnen naar type worden ingedeeld. Hieronder worden de belangrijkste groepen van respectievelijk primaire en secundaire verstoringen besproken. Dit overzicht is afgeleid van Vromans (2005).

2.3.1.1 Primaire verstoringen

Infrastructuur

Problemen met infrastructuur veroorzaken veelal grote verstoringen, ofwel calamiteiten. Voorbeelden zijn een kapotte wissel, een seinstoring, stroomuitval etc. Deze verstoringen komen in verhouding niet vaak voor, maar hebben een grote impact op de uitvoering van de dienstregeling. Bij de meeste calamiteiten zal aanpassen van de dienstregeling nodig zijn, om de treindienst zoveel mogelijk te behouden.

Materieel

De gevolgen van kapot materieel kunnen zeer divers zijn. Wanneer een treinstel kapot gaat, maar de andere treinstellen verder kunnen, zal de vertraging beperkt blijven tot het afkoppelen van het kapotte treinstel. Een andere mogelijkheid is dat een trein zijn maximumsnelheid niet meer kan rijden, en dus een langere rijtijd heeft. In meer extreme gevallen kan een kapotte trein een volledig baanvak of station blokkeren. Verstoringen door materieel komen in verhouding niet vaak voor, maar kunnen grote impact hebben op de uitvoering van de dienstregeling.

Personeel

Het laten rijden van treinen is een proces waarbij mensen betrokken zijn, dus het zal niet vlekkeloos verlopen. Zo heeft iedere machinist zijn eigen rijstijl en kan een conducteur eerder of later de deuren sluiten. Dit zijn processen die van nature een bepaalde kansverdeling hebben, maar de impact van de verstoringen is over het algemeen beperkt.

Passagiers

Grote groepen in- en uitstappende passagiers kunnen de oorzaak zijn van later vertrek. Ook passagiers die nog komen aanrennen als de trein wil weggrijden, kunnen verstoringen veroorzaken. Deze verstoringen komen redelijk veel voor, maar de gevolgen zijn over het algemeen beperkt.

Onderweg

Langs het spoor kunnen bijvoorbeeld wandelaars, spelende kinderen of ontsnapte dieren ervoor zorgen dat op een traject slechts 30 of 40 kilometer per uur gereden kan worden. Deze verstoring komt niet vaak voor en de impact is meestal redelijk beperkt.

2.3.1.2 Secundaire verstoringen

Secundaire verstoringen worden veroorzaakt doordat een trein niet aan de dienstregeling voldoet en daarmee ook verstoringen voor andere treinen veroorzaakt. Het verspreiden van verstoringen gebeurt zowel in plaats als in tijd (Vromans, 2005). Een aantal oorzaken voor het verspreiden van verstoringen is hieronder gegeven.

Gebruik van de infrastructuur

De capaciteit van een spoorwegennet is beperkt en het Nederlandse spoorwegennet is zeer druk bereden. Hierdoor is de volgafstand tussen treinen beperkt. Wanneer een baanvak of perron nog bezet is door een vertraagde trein, zal een volgende trein ook moeten wachten en daardoor ook vertraging oplopen.

Materieelcirculatie

Als een trein aankomt op zijn eindpunt, zal deze meestal ingezet worden voor een volgende rit. Als de vertraging van een trein groter is dan de tijd tot de volgende inzet, zal de volgende rit met vertraging beginnen.

Personeelsroosters

Personeel wisselt gedurende een dienst meestal meerdere keren van trein. Als een machinist of conducteur met vertraging aankomt, kan hij deze vertraging meenemen naar zijn volgende rit. Dit effect is vergelijkbaar met het verspreiden van de vertraging door de materieelcirculatie.

Aansluitingen

In dichte netwerken, zoals het Nederlandse spoorwegennet, komen vaak veel overstappen voor. De overstaptijd is vaak maar een paar minuten, terwijl missen van de aansluiting tot een kwartier, half uur of zelfs een uur vertraging leidt. Treinen wachten daarom soms enige tijd op een aansluitende trein, wat tot verspreiding van de vertraging leidt.

2.3.2 Grootte en verdeling van verstoringen

Uiteraard hebben niet alle verstoringen dezelfde omvang. Een stroomstoring kan er voor zorgen dat op bepaalde blokken gedurende enkele uren geen treinverkeer mogelijk is. Verstoringen van dat type komen echter niet vaak voor. Een veel voorkomende vertraging is dat een trein een paar seconden te laat vertrekt van het station. In de meeste gevallen zal dit niet opvallen, maar die paar seconden leveren wel een vermindering van de beschikbare rijtijd op. Een trein heeft dus voor zijn werkelijke rijweg een aantal seconden minder beschikbaar, waardoor de kans om op tijd aan te komen lager wordt.

Het is lastig om een verdeling voor verstoringen te bepalen, omdat treindetectiedata geen onderscheid maakt tussen primaire en secundaire verstoringen (Vromans, 2005). Goverde et al. (2002) hebben een gedetailleerde analyse gedaan van data rond station Eindhoven en vonden dat verlate aankomsten en vertrekken en te lange stationnementen benaderd kunnen worden met een exponentiele verdeling. Yuan (2006) heeft een vergelijkbare studie gedaan van station Den Haag Holland Spoor. ProRail heeft voor simulatiestudies met het macrosimulatiemodel SIMONE een aantal verdelingen ontwikkeld voor het landelijke netwerk. Deze zijn echter niet zonder meer bruikbaar voor andere modellen.

3 ROBUUSTHEID VAN EEN DIENSTREGELING

De manier waarop een dienstregeling reageert op verstoringen kan gezien worden als de robuustheid van de dienstregeling. Voor het bepalen van de robuustheid van een dienstregeling zijn diverse definities beschikbaar. Hieronder wordt een aantal van deze definities besproken. Op basis daarvan wordt een aantal waarden gekozen, die in dit onderzoek gebruikt zullen worden als maat voor de robuustheid.

3.1 Definities voor kwaliteit van een dienstregeling uit literatuur

In de literatuur is geen eenduidige beschrijving bekend voor de robuustheid van een dienstregeling. Hieronder wordt een aantal begrippen beschreven, opgedeeld naar punctualiteit, stabiliteit en reizigerskwaliteit.

3.1.1 Punctualiteit

De meeste vervoerders, zoals de NS in Nederland, gebruiken punctualiteit als grootte om hun dienstregeling te evalueren. Martin (2008) stelt dat punctualiteit gebruikt kan worden als maat voor de operationele kwaliteit. Deze kan zowel betrekking hebben op treinen als op reizigers. Het verschil hiertussen wordt veroorzaakt doordat reizigers voor een reis gebruik kunnen maken van verschillende treinen. Een reiziger is vertraagd in een punctuele trein als hij de vorige aansluiting gemist heeft. Aan de andere kant kan een reiziger in een vertraagde trein op tijd of zelfs te vroeg zijn, doordat hij de vertraagde trein heeft gehaald in plaats van een volgende trein.

Punctualiteit is een binaire maat, die bepaald of een trein 'op tijd' of 'te laat' is. De normen hiervoor verschillen per land; in Duitsland is een trein te laat als deze meer dan vijf minuten te laat is, in Groot-Brittannië bij meer dan tien minuten te laat (Martin, 2008). De punctualiteitsnorm was in Nederland tot en met 2008 drie minuten, maar is sinds 2009, in aansluiting op de internationale norm, verhoogd naar vijf minuten (Haighton, 2009).

Voor de formele punctualiteitscijfers van de NS, die gepubliceerd worden en die gebruikt worden in contracten met de overheid, worden niet alle stations en treinen beoordeeld. Alleen de aankomsten bij 34 grote stations en alleen treinen op het hoofdspoor, zie ook Bijlage 3: "Hoofdspoor", worden meegeteld (Vromans, 2005).

3.1.2 Stabiliteit

Een andere term die vaak voorkomt bij het bepalen van de kwaliteit van een dienstregeling is stabiliteit. Deze grootte heeft betrekking op het herstellervermogen van de dienstregeling in het geval van vertraging.

Delorme et al. (2007) geven als definitie van stabiliteit "het vermogen om vertraging te absorberen" en geven hiervoor drie eenheden:

- De tijd die een cyclische dienstregeling nodig heeft om te herstellen na een vertraging;
- De tijds marges die verschillende treinen hebben voordat zij ook andere treinen vertragen; en
- De statistieken van verschillende vertragingsscenario's.

Hierin is alleen de tweede eenheid theoretisch te bepalen; de overige zijn empirische waarden.

Ook Kroon et al. (2008) geven een aantal aspecten aan de hand waarvan de stabiliteit van een dienstregeling bepaald kan worden:

- Initiële verstoringen kunnen in zodanige mate geabsorbeerd worden, dat ze niet tot vertragingen leiden;
- Er zijn weinig doorgegeven vertragingen van de ene trein naar de andere; en
- Vertragingen verdwijnen snel, mogelijke met kleine bijsturingsmaatregelen.

Het eerste en het derde punt zijn het gevolg van ruimte in de dienstregeling in het algemeen, het tweede punt is het gevolg van doelmatige buffertijden tussen opeenvolgende treinen op bepaalde locaties.

Goverde (2008) maakt onderscheid tussen lokale stabiliteit van een open systeem en globale stabiliteit van een gesloten systeem (ofwel netwerkstabiliteit). Een gebied is lokaal stabiel als de som van de uitgaande vertragingen lager is dan de som van de ingaande vertragingen. Ingaande vertragingen komen van treinen die het systeem inrijden en treinen die in het systeem starten, uitgaande vertragingen komen van treinen die het systeem verlaten of hun eindpunt binnen het systeem bereiken.

De A2-corridor, het traject waar de NS in week 36 van 2009 gereden heeft met de 6-6 dienstregeling (zie ook 2.2.3.1), is een voorbeeld van een open systeem. Of de treindienst op de A2-corridor stabiel is, kan dus bepaald worden als het verschil tussen de ingaande en de uitgaande vertragingen.

3.1.3 Reizigerskwaliteit

Een andere mogelijkheid om naar de kwaliteit van een dienstregeling te kijken, is naar de kwaliteit van een treinreis voor de reiziger. Een voorbeeld is Carey (1992), die een kwaliteitsmaat beschrijft waarbij wordt gekeken naar de totale kosten voor een trip door een reiziger. Deze kosten zijn opgebouwd uit de kosten voor de geplande rijtijd en de wachttijd op stations/haltes, de verwachte kosten voor eerder of later aankomen op stations/haltes en de verwachte kosten van een later vertrek van een station/halte.

Het is lastig om de kwaliteit van een reis voor de reiziger te bepalen, omdat dan ook overstaprelaties moeten worden meegenomen. In deze studie zal voornamelijk gekeken worden naar de kwaliteit van de dienstregeling. Wanneer de kwaliteit van de dienstregeling goed is, levert dit ook een hogere kwaliteit van de treinreis op, omdat dan de reis vaker naar verwachting kan worden uitgevoerd. Daarnaast zal ook naar overstaprelaties worden gekeken.

3.2 Werkdefinitie voor robuustheid in het onderzoek

Op basis van de hierboven beschreven groot- en eenheden, wordt in deze studie de kwaliteit van een dienstregeling beoordeeld. Hiervoor worden drie verschillende waarden gebruikt, die in deze paragraaf gedefinieerd worden. Het betreft de punctualiteit, de netwerkstabiliteit en de kans om overstappen te halen.

Punctualiteit

De formele punctualiteitscijfers van de NS worden op een beperkt aantal punten voor een beperkt aantal treinen gemeten. Voor het bepalen van de kwaliteit van een dienstregeling, zijn echter alle stations en treinen relevant. De punctualiteit wordt voor dit onderzoek gedefinieerd als het percentage aankomsten op stations gedurende een dienstregelingsdag waarbij minder dan de punctualiteitsnorm van vijf minuten wordt afgeweken van de dienstregeling. In formule:

$$Punctualiteit = \frac{\sum_s Tr_s^p}{\sum_s Tr_s} \quad (1)$$

Hierin is Tr_s^p het aantal treinen dat minder dan vijf minuten te laat arriveert op een station s en Tr_s het totaal aantal treinen dat arriveert op station s .

De punctualiteit is een maat waarin alle treinstops zijn meegenomen. Daarbij wordt per trein een binair oordeel gegeven. Een trein komt binnen de norm aan, of daarbuiten. Wanneer een trein te laat komt, wordt verder niet meegewogen hoeveel dit is. Daarnaast geldt dat een trein die vaak stopt, zwaarder meetelt in de bepaling van de punctualiteit dan een trein die slechts enkele keren stopt.

Netwerkstabiliteit

De grootte van de ingangsvertraging is de som van alle vertragingen van treinen die het model inrijden en die in het model aan hun dienst beginnen. De uitgangsvertraging kan berekend worden als de som van de vertragingen van treinen die het model verlaten of binnen het model bij hun eindpunt aankomen. Beide vertragingen worden bepaald gedurende een dienstregelingsdag. In formule ziet de netwerkstabiliteitsmaat er als volgt uit:

$$Netwerkstabiliteit = \frac{\sum_i vert_i^{uit}}{\sum_i vert_i^{in}} \quad (2)$$

Hierin is $vert_i^{in}$ de ingangsvertraging van trein i , $vert_i^{uit}$ de uitgangsvertraging van trein i . Wanneer de netwerkstabiliteit kleiner is dan 1 dempen vertragingen uit en is het netwerk stabiel, anders is het instabiel.

De netwerkstabiliteit is een maat die kijkt op treinniveau. Iedere trein die in het model rijdt wordt twee keer meegeteld, namelijk aan het begin van zijn rit en aan het einde. Het is een ratioschaal, de grootte van de vertragingen speelt een rol. Als nulpunt is gedefinieerd dat een trein geen vertraging heeft. Wanneer een trein dus te vroeg is, wordt de vertraging als nul meegenomen. Dit is gedaan om te zorgen dat treinen die te vroeg zijn, niet kunnen compenseren voor de treinen die te laat zijn. Hoe lang een rit van een trein duurt, wordt in de bepaling niet meegenomen. Korte ritten kunnen hierdoor in verhouding zwaar meewegen. Door de uitgangsvertraging te delen door de ingangsvertraging, is het mogelijk de netwerkstabiliteit voor verschillende modelruns met elkaar te vergelijken. Dit is een toevoeging aan de netwerkstabiliteit zoals die gedefinieerd is volgens Goverde (2008), waarin sprake is van het verschil tussen de ingangsvertraging en de uitgangsvertraging.

Overstaphaalkans

Een vertraagde trein kan tot gevolg hebben dat reizigers hun aansluiting missen. Ze moeten dan op de volgende trein wachten, waardoor de vertragingstijd sterk kan oplopen.

De kans om een overstap te halen wordt bepaald volgens:

$$\text{Overstaphaalkans voor relatie } ij = \frac{Tr_{ij}^h}{Tr_{ij}} \quad (3)$$

Hierin is Tr_{ij} het totale aantal treinen dat op een dag aankomt waarvoor overstap van trein i op trein j bestaat. Tr_{ij}^h is het aantal treinen waarbij de overstap gehaald wordt. Een overstap wordt gehaald als:

$$v_j - a_i - ot_{ij} > 0 \quad (4)$$

Hierin is v_j de vertrektijd van trein j , a_i de aankomsttijd van trein i en ot_{ij} de overstaptijd die nodig is voor de overstap van trein i op trein j , zoals gedefinieerd in het Spoorboekje 2009 (NS, 2008).

Het is binnen het onderzoek niet mogelijk om voor alle overstaprelaties binnen het model de overstaphaalkans te bepalen. Daarom wordt de overstaphaalkans in het onderzoek bepaald voor de overstaprelaties waarvan de aankomende trein in de 6-6 dienstregeling daadwerkelijk zes keer per uur rijdt op de A2-corridor en de vertrekkende trein maximaal twee keer per uur rijdt.

De bepaling van de overstaphaalkans bestaat per trein uit een binaire beslissing, een overstap wordt gehaald of een overstap wordt gemist. Hij is daarin vergelijkbaar met de punctualiteit. Het aantal minuten waarmee een overstap gemist wordt, is niet van belang voor de berekening van de overstaphaalkans.

4 EVALUATIE VAN EEN DIENSTREGELING

De effecten van verstoringen op de dienstregeling kunnen met verschillende methoden bepaald worden, waarvan er hieronder een aantal beschreven worden. Vervolgens wordt aandacht besteed aan simulatie, de methode die in dit onderzoek gebruikt wordt voor het evalueren van een dienstregeling. Tenslotte wordt de simulatiesoftware die in het onderzoek gebruikt wordt, OpenTrack, besproken.

4.1 Methoden voor evaluatie van een dienstregeling

Het evalueren van een dienstregeling kan op basis van drie verschillende analysemethoden, namelijk op basis van realisatiedata, met analytische modellen en op basis van simulatie (Vromans, 2005). Hieronder worden deze drie kort besproken.

Analyse op basis van realisatiedata wordt over het algemeen gebruikt om locaties of treinlijnen met een hoge dispunctualiteit te onderzoeken op knelpunten. Deze onderzoeken worden meestal gedaan door spoorvervoerders en de resultaten blijven vaak verborgen voor de wetenschap (Vromans, 2005). Het onderzoeken van een gehele dienstregeling of een groter deel hieruit is vaak omslachtig op basis van realisatiedata.

Analytische modellen hebben als voordeel dat ze geen grote hoeveelheden data nodig hebben als invoer en dat de rekentijd meestal relatief kort is. Hierdoor zijn ze te gebruiken voor simpele systemen en kunnen ze ondersteuning bieden bij de eerste fases van de ontwikkeling van een dienstregeling (Jia et al., 2008). Een bekend voorbeeld van een analytisch model is (max, +) algebra. In dit model wordt met behulp van twee operaties, namelijk bepaling van het maximum en optellen, bepaald wat het effect van een vertraagde trein is op een cyclische dienstregeling (Goverde, 2007).

Simulaties kunnen gebruikt worden om de invloed van vertragingen op de treincirculatie te analyseren, op basis van een gegeven dienstregeling. Hiervoor zijn gedetailleerde invoergegevens nodig, onder andere met betrekking tot infrastructuur en materieelkarakteristieken (Vromans, 2005). Er zijn verschillende simulatieprogramma's in gebruik. SIMON is een Zweeds simulatieprogramma dat gehele netwerken kan simuleren. In Duitsland wordt gebruik gemaakt van SABINE en VirtuOS. In Nederland gebruiken NS en ProRail het programma SIMONE, een model dat simulaties voor heel Nederland kan uitvoeren. OpenTrack (Huerlimann, sd) is een softwarepakket dat in verschillende landen en met verschillende toepassingen gebruikt wordt.

4.2 Simulatie als evaluatiemethode

Simulatie is een evaluatie methode gebaseerd op herhaalde imitatie van een systeem, waarbij gebruik wordt gemaakt van een versimpelde weergave van dat systeem. Het is bijzonder geschikt voor de analyse van gecompliceerde en sterk verknoopte processen, zeker in combinatie met stochastische verstoringen. Dit zijn exact de karakteristieken van een druk spoorwegennet (Vromans, 2005).

Voorbeelden van evaluatiestudies zijn Jia et al. (2008) en Vromans et al. (2004). Voor de evaluatie van vertragingen met simulaties worden in beide studies de primaire vertragingen (zie hoofdstuk 2.3) als gegeven beschouwd en worden de secundaire vertragingen die ontstaan in een bepaalde dienstregeling geëvalueerd.

4.2.1 Voordelen en nadelen van simulaties

Simulatie als methode om onderzoek te doen aan ingewikkelde stochastische systemen, zoals een spoorwegnetwerk, heeft voor- en nadelen. Vromans (2005) geeft een overzicht van een aantal van deze voor- en nadelen. De belangrijkste hiervan staan hieronder, eerst de voordelen, dan de nadelen.

- + Simulatie kan, in tegenstelling tot de meeste analytische modellen, een geheel netwerk simuleren.
- + Simulatie en analytische modellen bieden de mogelijkheid om in de toekomst te kijken, of verschillende scenario's te testen. Op basis van realisatiedata kan alleen het verleden worden onderzocht. Dit betekent dat om aanpassingen aan bijvoorbeeld dienstregeling en/of infrastructuur te evalueren deze eerst in de praktijk toegepast moeten worden voordat ze getest kunnen worden.
- + Simulaties geven zeer gedetailleerde output, terwijl de output van analytische modellen vaak beperkt blijft tot basisgegevens.
- ± Simulatiemodellen hebben de mogelijkheid om op vrijwel elk detailniveau te werken, terwijl analytische modellen vaak onvoldoende gedetailleerd werken. Toevoegen van meer details verhoogt echter ook de onzekerheid en de afhankelijkheid van goede invoergegevens. Daarnaast verlengt verhoging van het detailniveau ook de simulatietijd.
- Simulatie geeft geen directe informatie hoe een goede dienstregeling eruit zou moeten zien, of hoe de bestaande dienstregeling verbeterd kan worden. Met interpretaties kunnen wel ideeën voor verbetering worden opgedaan en deze kunnen redelijk eenvoudig worden getest door het uitvoeren van een nieuwe simulatie.
- De verstoringsgegevens die in een simulatie gebruikt worden, zijn meestal gebaseerd op aannames over verstoringen, omdat de precieze grootte en frequentie van verstoringen vaak onbekend zijn. Een andere optie is het gebruik van realisatiedata voor het bepalen van verstoringen. Hierdoor wordt werkelijke data als input gebruikt. Het zal dan echter altijd een selectie van data betreffen, bijvoorbeeld een maand.

4.2.2 Keuze voor simulatie als evaluatiemethode

Op basis van realisatiedata is het niet mogelijk de robuustheid van de 6-6 dienstregeling op de A2-corridor te onderzoeken. Er is weliswaar een proef gedaan met deze dienstregeling, maar hierin zijn vrijwel geen verstoringen voorgekomen. Daarnaast heeft de proef slechts vijf dagen geduurd (zie ook 2.2.3.1).

De A2-corridor kan gezien worden als een groot spoorwegnet. Op de corridor zijn acht aantakende spoorverbindingen. Hierdoor is de treinenloop een verknoopt proces van treinen op de corridor en treinen die in- en uitvoegen. Met behulp van analytische modellen is het complex om van een dergelijk systeem de robuustheid te bepalen. Simulatie leent zich juist bijzonder goed voor een dergelijk probleem. Daarnaast is de beschikbare analytische methode voor het bepalen van de robuustheid van een dienstregeling, (max, +) algebra, gebaseerd op cyclische dienstregelingen. De 6-6 dienstregeling is met de hogere frequenties in de spits echter niet cyclisch. Simulatie lijkt dus de geschikte methode om de robuustheid van de 6-6 dienstregeling op de A2-corridor te onderzoeken.

Als nadeel van simulaties is genoemd dat alleen bestaande dienstregelingen geëvalueerd kunnen worden. Dit is voor het onderzoek geen probleem, omdat beide te onderzoeken dienstregelingen bekend zijn. Daarnaast is een nadeel dat verstoringgegevens gebaseerd zijn op aannames over verstoringen. Het effect hiervan kan beperkt worden door de verdelingen af te leiden uit realisatiecijfers op de corridor en door dezelfde vertragingen toe te passen voor de te vergelijken dienstregelingen.

4.3 Simulatiesoftware: OpenTrack

De robuustheid van de 6-6 dienstregeling wordt onderzocht met behulp van simulaties. In deze paragraaf wordt aandacht besteed aan simulatiemodellen. Eerst wordt een aantal classificaties voor deze modellen besproken. Vervolgens wordt aandacht besteed aan OpenTrack, het computerprogramma waarmee in dit onderzoek simulaties worden uitgevoerd.

4.3.1 Simulatie types

Law en Kelton (2000) geven drie verschillende classificaties voor simulatiemodellen.

- Statisch versus dynamisch. In een statisch model speelt tijd geen rol, terwijl bij dynamische simulaties de ontwikkeling van een systeem in de tijd wordt weergegeven.
- Deterministisch versus stochastisch. Een deterministische simulatie bevat geen toevalsvariabelen. Deze simulaties zijn geschikt wanneer de deterministische relaties in een systeem te complex zijn om analytisch te benaderen. Wanneer er toevalsvariabelen in de simulatie voorkomen, heet deze stochastisch.
- Continu versus discreet. In continue simulaties veranderen de variabelen continu over de tijd, terwijl in discrete simulaties de variabelen veranderen op een telbaar aantal tijdstippen.

Op het gebied van treinsimulaties heeft Pachtl (2002) nog een onderscheid ontwikkeld, namelijk tussen synchrone en asynchrone simulatie. Bij synchrone simulatie wordt een vooraf opgestelde dienstregeling gesimuleerd, terwijl bij asynchrone simulatie de routes van de treinen stochastisch gegenereerd worden. Conflicten worden dan opgelost met behulp van afhandelingsregels.

4.3.2 Eigenschappen OpenTrack

De simulaties in dit onderzoek worden uitgevoerd met het programma OpenTrack. Dit is een programma dat ontwikkeld is voor het simuleren van treinen door het Swiss Federal Institute of Technology (ETH) (Huerlimann, sd). Het programma wordt wereldwijd gebruikt voor zowel commerciële doelen als onderzoek.

Volgens de classificatie in 4.3.1 kan OpenTrack beschreven worden als een dynamisch, continu en synchroon simulatiemodel, dat zowel deterministisch als stochastisch kan werken. De eigenschap dynamisch volgt direct uit het voorliggende probleem, het rijden van treinen van a naar b kost tijd. Ook de keuze voor een synchroon model volgt uit het voorliggende onderzoek, namelijk het evalueren van bepaalde dienstregelingen.

De vierde eigenschap van OpenTrack is dat het een continu simulatie model is. Dit betekent dat voor alle treinen in het model met kleine, vaste tijdstappen berekend wordt wat hun positie, snelheid, versnelling, etc is. Hierdoor “rijden” ze als het ware door het model. De standaard waarde voor de tijdstappen in OpenTrack is één seconde.

Nadeel van continue modellen is dat veel berekeningen gedaan moeten worden, waardoor de simulatietijd zeer groot kan worden. Met de vergroting van de rekensnelheid van computers is dit probleem echter steeds minder van belang. Een run van een dienstregelingsdag van de A2-corridor met tijdstappen van één seconde duurt met de beschikbare PC ongeveer twee uur. Met tijdstappen van vijf seconden wordt dit teruggebracht tot rond de twintig minuten.

OpenTrack kan zowel deterministische als stochastische simulaties uitvoeren. De basis van een simulatie is deterministisch, treinen rijden volgens de gegeven dienstregeling. Het toevoegen van stochastische elementen kan door invoeren van verdelingen voor ingangsvertragingen en verdelingen voor de rijprestaties.

4.3.2.1 Infrastructuur

De basis voor simulaties in OpenTrack is de infrastructuur. Deze wordt opgebouwd uit punten met daartussen lijnstukken. De ligging van de punten wordt vastgelegd met een kilometerpunt. Daarnaast kunnen aan een punt andere eigenschappen worden meegegeven, zoals de aanwezigheid van een sein op dat punt, de ligging van het punt in een stationsgebied, etc.

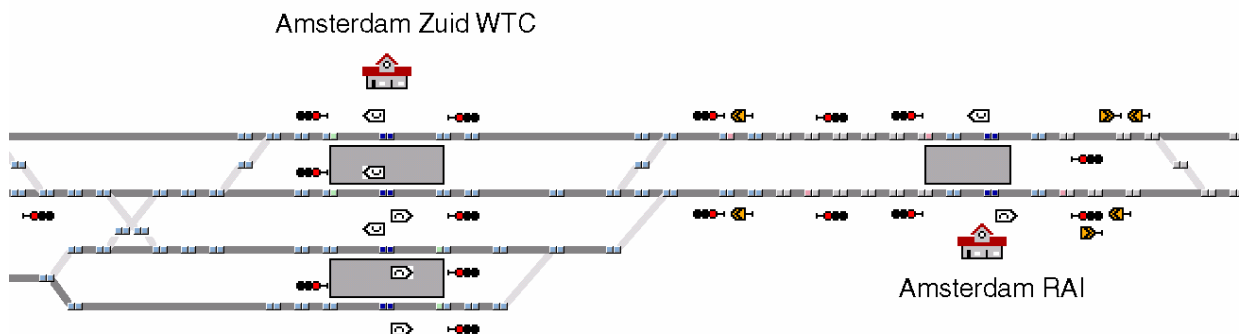
De lengte van de lijnstukken tussen de punten wordt bepaald als het absolute verschil tussen de twee kilometerpunten die het lijnstuk verbindt. Vervolgens kan aan het lijnstuk een aantal eigenschappen worden meegegeven, zoals de maximale snelheid die gereden mag worden, gedifferentieerd naar rijrichting en de eventuele aanwezigheid van een tunnel, aangezien de aanwezigheid van een tunnel invloed heeft op de snelheid en versnelling van een trein.

Elementen als wissels, stations en emplacementen worden opgebouwd uit een aaneenschakeling van punten en lijnstukken. Stations worden opgebouwd als een aantal parallelle sporen, die samen een stationsgebied vormen. Binnen het stationsgebied worden stationspunten gedefinieerd, waar tijdens de simulaties meetgegevens verzameld worden. Deze stationspunten moeten door het gehele station het hetzelfde kilometerpunt liggen, zodat de meetgegevens voor alle treinen die door het station rijden op dezelfde plaats bepaald worden.

Stationspunten worden ook gebruikt voor andere dienstregelingspunten, zoals aansluitingen. Dit zijn plaatsen waar spoor uit twee verschillende richtingen bij elkaar komt. Tenslotte kunnen stationspunten ook door de gebruiker worden toegevoegd aan de bestaande infrastructuur. Door het toevoegen van deze punten kan de volgorde van treinen in sommige gevallen beter geregeld worden (zie 5.1.2).

In Figuur 1 is te zien hoe de stations Amsterdam Zuid WTC en Amsterdam RAI weergegeven worden in OpenTrack, met daartussen de vrije baan. De donker grijze lijnen representeren de sporen, de blokjes waartussen de lijnen lopen zijn de punten. Wanneer de blokjes licht blauw zijn, zijn ze onderdeel van een station; licht grijze blokjes liggen in de vrije baan. Roze en groene blokjes ontstaan wanneer vanaf dat blokje een respectievelijk routes en trajecten gedefinieerd zijn. De donker blauwe blokjes zijn de stationspunten, de meetpunten voor het verzamelen van data over aankomst, vertrek en doorkomst op een station.

Na wissels is de spoorbaan in sommige gevallen lichter gekleurd; dit betekent dat het wissel eerst verzet moet worden om over die spoorbaan te kunnen rijden. Langs het spoor zijn de seinen en snelheidsborden aangegeven, als “stoplichten” en gele driehoeken. De grote grijze blokken zijn de perrons, met in het wit borden die aangeven waar het midden van de trein moet staan. Het model is niet op schaal; de afstanden tussen punten kunnen dus per lijnstuk verschillen.



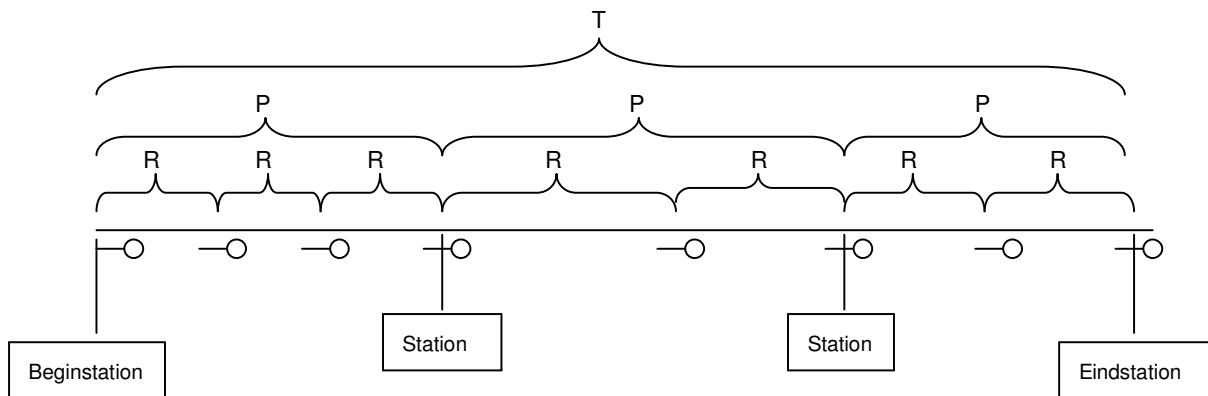
Figuur 1: Weergave infrastructuur in OpenTrack

4.3.2.2 Routes, paden en trajecten

Nadat de ligging van alle punten en lijnstukken bepaald is, moeten de routes door het model vastgesteld worden. Een route loopt van een sein naar het volgende sein. Bij het vaststellen van de routes wordt ook bepaald welke seinbeelden een sein kan geven, dus of het bijvoorbeeld alleen groen en rood kan geven, of ook geel of andere snelheidsaanduidingen.

Op basis van routes kunnen paden gedefinieerd worden. Een pad is een rijweg tussen verschillende stations, bestaande uit een opeenvolging van routes. Tenslotte worden de trajecten gedefinieerd. Een traject geeft de volledige rijweg van een trein tussen zijn begin- en eindstation. Het is dus vastgelegd over welke sporen een trein zal rijden bij het uitvoeren van de dienstregeling. Aan een trein kunnen meerdere trajecten worden toegewezen, met een prioriteit.

Een pad bestaat dus uit een set van routes en een traject bestaat uit een set van paden. In Figuur 2 op de volgende pagina is dit schematisch weergegeven. Hierin staat —○ voor een sein, R voor route, P voor pad en T voor Traject.



Figuur 2: De samenhang tussen routes, paden en trajecten.

4.3.2.3 Treinen en treinseries

In het model kunnen treinseries worden gedefinieerd. Deze vormen een set van treinen die op hetzelfde traject in dezelfde richting rijden. Deze series komen ook in de dienstregeling voor. Per treinserie kunnen materieelkarakteristieken worden meegegeven, zoals het type trein en het aantal treinstellen. Daarnaast kan aangegeven worden of de trein al snelheid heeft op het moment dat hij het model binnenrijdt.

Aan het materieel, dus zowel aan locomotieven als aan treinstellen en goederenwagens, zijn karakteristieken verbonden. Hierin zijn onder andere gewicht en lengte, maximumsnelheid, luchtweerstand en rem- en optrekarakteristieken vastgelegd.

Naast de materieelkarakteristieken kunnen vertragsingskarakteristieken worden aangegeven. Deze bepalen de initiële vertraging van een trein, dus op het moment dat hij het model binnen komt.

Naast de vertragingen kan ook een verdeling voor de prestatie van de machinist worden aangegeven. Sommige machinisten zullen precies de toegestane snelheid rijden en zo hard mogelijk optrekken, terwijl anderen een marge in de snelheid houden en meer tijd nemen om deze snelheid te bereiken. De verdeling voor de prestatie van een machinist kan gedifferentieerd worden naar de situatie waarbij de trein op tijd rijdt en waarbij de trein vertraging heeft, omdat machinisten vaak met een hogere snelheid zullen rijden en harder zullen optrekken als ze een vertraagde trein besturen.

4.3.2.4 Dienstregeling

De dienstregeling wordt per trein apart ingevoerd. De geplande aankomst- en vertrektijd van een trein kan op alle punten die als station of knooppunt gedefinieerd zijn, worden aangegeven. Het is niet noodzakelijk voor alle punten een tijd te definiëren. Op stations kan aangegeven worden dat gestopt moet worden. Wanneer een trein stopt op een station, zal deze niet vertrekken voordat zijn geplande vertrektijd is aangebroken.

Naast de geplande vertrektijd kan een minimale halteertijd worden weergegeven. Ook als de vertrektijd van een trein al verstreken is bij een stop, zal een trein gedurende deze tijd op het station blijven wachten. Dit geeft passagiers de mogelijkheid om in- en uit te stappen, ook als de trein vertraagd is.

In de dienstregeling kunnen ook verbindingen tussen treinen worden aangegeven. Hiermee kan bepaald worden dat treinen op elkaar moeten wachten, bijvoorbeeld om een overstap of inhalen van een sprinter door een intercity te garanderen. Ook kan hiermee aangegeven worden dat materieel na aankomst weer ingezet wordt op een volgende rit, zodat deze rit niet vertrekt voordat het materieel aangekomen is. Tenslotte kan met de verbindingen ook letterlijk een verbinding gemaakt worden, namelijk als een trein moet koppelen of juist ontkoppelen.

4.3.2.5 Simulatie

Bij het uitvoeren van een simulatie zullen de treinen gaan rijden op basis van de dienstregeling. Daarbij legt het beveiligingssysteem beperkingen op. Zoals beschreven in 2.1.2 mogen er nooit twee treinen tegelijk in een blok zijn. Wanneer een trein een bezet baanvak wil inrijden, zal hij dus moeten wachten tot het baanvak vrij is. Dit proces kan verschillen tussen de gesimuleerde treinloop en de dienstregeling opleveren, ook als er geen verstoringen worden ingevoerd. Bij het toelaten van treinen tot een baanvak, wordt uitgegaan van het First Come First Served (FCFS) principe.

Het rijgedrag van treinen in OpenTrack is gemodelleerd met behulp van fysische vergelijkingen voor onder andere optrekken, afremmen en snelheid houden. In de paragrafen 5.2 en 5.3 van de OpenTrack handleiding is hiervan een uitgebreide beschrijving gegeven (Huerlimann en Nash, 2010).

4.3.2.6 Output

De output van een simulatierun bestaat uit een tijd-weg diagram, waarin afgelezen kan worden welke trein waar was op welk tijdstip. Doordat ook de dienstregeling wordt weergegeven, kan een vergelijking van de simulatie van een trein met zijn dienstregeling worden gemaakt. Ook wordt het in het tijd-weg diagram weergegeven als een trein een geel of een rood sein tegengekomen is en als hij op een dienstregelingspunt achterloopt op de geplande tijd volgens de dienstregeling. In Bijlage 5: "Tijd-weg diagram uit OpenTrack" is een voorbeeld van een tijd-weg diagram gegeven. De diagrammen zijn vooral geschikt voor het uitvoeren van kwalitatieve analyses. Een trein kan precies gevolgd worden en problemen in de uitvoering van de dienst zijn duidelijk zichtbaar. Het is echter lastig op basis van de diagrammen te bepalen hoe groot de totale vertraging was, of hoeveel treinen er vertraagd waren gedurende de gehele simulatie. Een ander nadeel is dat per diagram slechts één simulatierun weergegeven kan worden.

Naast de visuele output in de vorm van een diagram wordt ook een databestand gemaakt, waarin voor alle treinen de vertrekken, aankomsten en doorkomsten bij stationspunten gegeven wordt. Dit document bevat per trein, per stationspunt de volgende informatie:

- Scenario, het vertragingsscenario dat gebruikt is;
- Treinnummer;
- Station, het station waar de regel betrekking op heeft,
- Geplande aankomst;
- Gepland vertrek;
- Werkelijke aankomst;
- Werkelijk vertrek;
- Verschil tussen geplande en werkelijke aankomst; en
- Verschil tussen gepland en werkelijk vertrek.

Wanneer een trein een stationspunt alleen passeert en er niet stopt, wordt alleen een werkelijke vertrektijd opgeslagen; de werkelijke aankomsttijd wordt dan leeg gelaten. Omdat per stationspunt in ieder geval de vertrektijd en indien mogelijk de aankomsttijd worden opgeslagen, is het mogelijk om de waarden voor robuustheid, zoals gedefinieerd in 3.2, te berekenen.

Zoals blijkt uit bovenstaande beschrijving is het mogelijk om in OpenTrack een groot aantal aspecten van de werkelijkheid na te bootsten. Het programma lijkt daarmee geschikt om twee dienstregelingen te vergelijken en daarmee een uitspraak te kunnen doen over de uitvoering van deze dienstregelingen in werkelijkheid. Daarnaast geeft het programma voldoende output om de waarden te bepalen die gedefinieerd zijn als mate van robuustheid.

5 OPZET SIMULATIES

In hoofdstuk 4 zijn simulaties als methode voor evaluatie van een dienstregeling besproken. Om deze methode te kunnen toepassen is een model gebouwd, waarin de te onderzoeken dienstregelingen op de A2-corridor zo goed mogelijk gesimuleerd worden.

Op de volgende pagina is in Figuur 3 een schematische weergave van de opzet van de simulaties gegeven. Eerst moet het model worden opgebouwd. Hiervoor worden drie databronnen gebruikt, namelijk de dienstregelingen, realisatiecijfers en de infrastructuur. Op basis van de realisatiecijfers zullen verdelingen voor de ingangsvertraging en de prestatie van de treinen op de vrije baan worden opgezet. Vervolgens worden de simulaties uitgevoerd. Met de output van de simulaties kunnen de 6-6 dienstregeling en de standaarddienstregeling vergeleken worden op robuustheid. Tenslotte kunnen hier conclusies aan worden verbonden.

In dit hoofdstuk zullen de eerste twee stappen van de figuur besproken worden, namelijk de opzet van het model en de uitvoering van de simulaties. De resultaten en de conclusies zullen in de hoofdstukken hierna worden besproken.

5.1 Dienstregelingen

Voor de vergelijking van de twee dienstregelingen op robuustheid zijn deze beide ingevoerd in het model. Vervolgens is een aantal aanpassingen gedaan aan het model om de treinenloop te laten voldoen aan de gegeven dienstregeling.

5.1.1 Invoer dienstregelingen

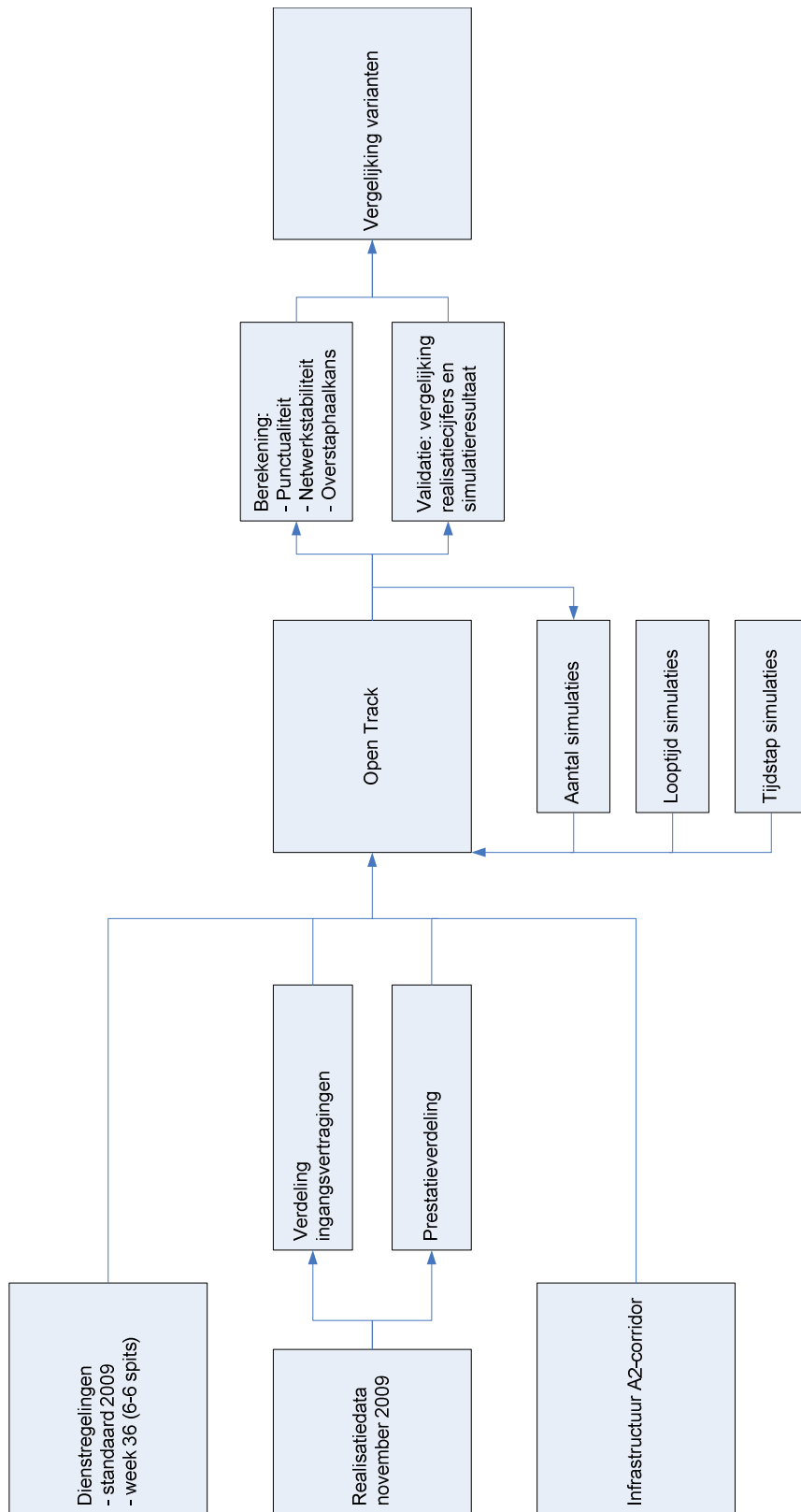
Eerst zal de invoer van de reizigerstreinen behandeld worden, met een toelichting op de parameters met betrekking tot halteertijden en verbindingen. Vervolgens wordt de invoer van de goederentreinen behandeld.

5.1.1.1 Reizigerstreinen

De standaarddienstregeling van 2009 is gebaseerd op de dalperioden van de dienstregeling van week 36, waar in de dalperioden ook volgens de standaarddienstregeling wordt gereden. De spitsperioden zijn, voor zowel de reizigerstreinen als de goederentreinen, ingevuld met behulp van de BUP's uit de jaardienst van 2009 van ProRail.

De 6-6 dienstregeling is ingevoerd op basis van het dagplan van maandag 31 augustus 2009. Een dagplan is een overzicht met de geplande vertrek- en aankomsttijden van alle (reizigers)treinen gedurende een dienstregelingsdag. Deze dagplannen worden ook in de werkelijke uitvoering van het treinverkeer gebruikt.

Het materieel waarmee gereden wordt is per treinserie en per richting apart ingevoerd. Dit is gedaan op basis van de maatgevende situatie. Hierbij wordt de maatgevende situatie bepaald door de tijd die het materieel nodig heeft om op te trekken en af te remmen. Langere optrek- en afremtijden zorgen er namelijk voor dat een trein langer over een traject doet en meer effect ondervindt wanneer hij door een andere trein wordt gehinderd.



Figuur 3: Opzet simulaties

Als een trein op een station stopt, is een minimale halteertijd ingevoerd. Deze is afhankelijk van het type station, het soort trein (IC of sprinter) en het materieel. In Tabel 3 zijn de minimale halteertijden weergegeven.

Een halte langs de vrije baan is een station waar de trein op de doorgaande spoorbaan stopt. Bij stops op stations wordt in de dienstregeling onderscheid gemaakt tussen de korte stop en haltering waarbij zowel de aankomst- als vertrektijd is aangegeven. Over het algemeen vinden korte stops plaats bij kleinere stations. Bij Sprinters is bij een korte stop het materieeltype relevant, omdat de tijd die nodig is voor de vertrekprocedure (fluiten, deuren sluiten, wegrijden) de minimale halteertijd beïnvloedt. De vertrekprocedure is voor al het intercitymaterieel gelijk, waardoor de halteertijden van IC's niet afhankelijk zijn van het materieeltype.

Type stop	Minimale halteertijd (s)			
	IC	Sprinter type Plan V	Sprinter type mDDM	Sprinter type SGM3
Halte langs de vrije baan	--	36	36	30
Station (korte stop)	60	36	36	30
Station	120	60	60	60

Tabel 3: Minimale halteertijden.

In sommige gevallen eindigt een treindienst binnen het model en vertrekt het materieel weer voor een andere dienst. Wanneer dit het geval is, is dit door middel van een verbinding in het model aangegeven. De nieuwe dienst kan dan niet vertrekken voordat de oude dienst op het station is aangekomen en hij drie minuten heeft stilgestaan. Deze drie minuten zijn nodig om de machinist de kans te geven naar de andere kant van de trein te lopen. Een voorbeeld hiervan is de overgang van de even 16000 serie op de oneven 6000 serie. Wanneer trein 16066 uit de richting van 's-Hertogenbosch in Utrecht aankomt, vertrekt hij weer als trein 6073 richting Tiel.

5.1.1.2 Goederentreinen

De goederentreinen zijn ingevoerd op basis van de BUP's van ProRail voor de standaarddienstregeling 2009 (standaarddienstregeling en dalperioden 6-6) en van NSR (6-6 dienstregeling tijdens de spits). Omdat voor de goederentreinen geen dagplan beschikbaar was, zijn de overgangen tussen spits en dal voor de goederentreinen ingevuld zodat ze zo goed mogelijk aansluiten bij de overgangen van de reizigerstreinen.

Zoals beschreven in 2.2.2.1 kunnen niet alle goederenpaden tegelijk benut worden. In het model zijn goederentreinen zo ingepland, dat een zo groot mogelijk aantal verschillende goederenpaden gebruikt wordt. Het goederenpad tussen Beverwijk en Visé maakt gebruik van de gehele corridor, tussen Amsterdam Centraal en Eindhoven. Daarom is deze trein eerst ingepland; het ene uur van noord naar zuid en het andere uur van zuid naar noord. Vervolgens zijn treinen ingepland op de paden door een deel van de corridor. Ook deze rijden het ene uur in de ene richting en het volgende uur in de tegenovergestelde richting. In totaal wordt op deze manier de helft van de goederenpaden uit de BUP's benut. Ter vergelijking, tijdens een normale dienstregelingsdag ligt de benutting van goederenpaden gemiddeld rond de 25 %. Hierbij zijn er verschillen per pad; drukke trajecten kennen een benutting van rond de 40 %, rustige trajecten van rond de 5 %. In Bijlage 6: "Overzicht goederenpaden" is een overzicht gegeven van de goederenpaden die tijdens de simulaties benut worden.

Het materieel waarmee de goederenvervoerders rijden verschilt per vervoerder en per type lading. Tussen een herkomst en bestemming rijdt echter een beperkt aantal vervoerders, meestal met vergelijkbare ladingen. Hierdoor is per goederenpad een beperkt aantal combinaties van een locomotief met goederenwagons te specificeren. Uit deze combinaties is, net als bij de reizigerstreinen, per goederenpad de maatgevende combinatie gekozen en ingevoerd in OpenTrack.

5.1.2 Kalibreren dienstregelingen

Wanneer een simulatie zonder vertragingen wordt uitgevoerd, zou deze moeten voldoen aan de dienstregeling. De dienstregeling is echter niet conflictvrij, waardoor het niet in alle gevallen mogelijk is er precies aan te voldoen. Daarnaast is de dienstregeling op een aantal plaatsen zo krap ingelegd, dat het niet mogelijk is voor de treinen om op tijd te zijn, ook als ze geen hinder ondervinden. Dit is bijvoorbeeld het geval bij de oneven 9600 serie, van 's-Hertogenbosch naar Deurne, bij het station Eindhoven Beukenlaan, waar hij altijd drie minuten te laat is. Daarnaast geeft de dienstregeling een constante snelheid tussen stations gegeven, terwijl optrekken en afremmen van treinen voor variaties in de snelheid zorgen.

Daarnaast geeft het invoeren van de dienstregeling als zodanig niet voldoende informatie aan het model om de treinen ook volgens deze dienstregeling te laten rijden. Dit komt door een aantal verschillen tussen het aansturen en rijden van treinen in het model en in de werkelijkheid. In Bijlage 7: "Optimalisatie treinenloop in OpenTrack" wordt verdere aandacht besteed aan deze verschillen en de aanpassingen die gedaan zijn om de treinenloop in OpenTrack zoveel mogelijk volgens de werkelijkheid te laten plaatsvinden.

Bij het kalibreren van de dienstregeling in OpenTrack is een grens aangehouden van twee minuten. Dit betekent dat, wanneer een simulatie wordt gedaan zonder gedefinieerde vertragingen, de vertragingen van de treinen in de simulatie maximaal twee minuten mogen zijn. Op deze grens is uiteraard een uitzondering gemaakt wanneer de dienstregeling zo strak is ingelegd dat deze onhaalbaar is. Voor treinen die te vroeg zijn, is geen tijdsgrens vastgesteld. Voorwaarde is dat ze andere treinen niet hinderen en dat ze niet van volgorde wisselen met andere treinen.

5.2 Stochastische elementen uit realisatiecijfers

De simulaties bestaan eruit dat de treinen gaan rijden volgens hun dienstregeling. Bij het ingaan van het model krijgen ze echter een vertraging mee. Daarnaast wordt de prestatie van een trein tussen twee stations als stochastische waarde uit een verdeling getrokken. Hieronder wordt aandacht besteed aan de verdelingen die gebruikt worden tijdens de simulatie.

Omdat de kennis over verstoringsverdelingen beperkt is (zie 2.3.2), zijn in deze studie de verdelingen bepaald op basis van realisatiegegevens. De data die hiervoor gebruikt is, is afkomstig van het Prestatie Analyse Bureau van ProRail. De data bestaat uit de geplande en gerealiseerde vertrekken, aankomsten en doorkomsten op de grotere stations van de treinseries in het studiegebied voor de maand november 2009. In deze maand is de standaard dienstregeling van 2009 gereden. Er waren in november 2009 geen schoolvakanties en geen extreme weersomstandigheden. Omdat de 6-6 dienstregeling alleen op doordeweekse dagen (maandag tot en met vrijdag) zal rijden, is ook alleen deze dagen van de realisatiedata gebruikt.

Ingangsvertragingen

De gebruikte verdelingen bestaan uit percentages treinen die ten opzichte van de geplande vertrek- of doorkomsttijd een bepaalde afwijking hebben. Wanneer een trein het model moet binnenrijden, wordt uit de verdeling een vertragingstijd bepaald. Deze tijd komt de trein te laat het model binnen. De verdelingen zijn per treinserie en per richting (even en oneven treinnummers) bepaald. Bijlage 8: "Bepaling verdelingen uit realisatiedata" geeft een beschrijving van de bepaling van de ingangsvertragingen.

Prestatieverdeling

Uitgangspunt voor de bepaling van de prestatie van de treinen zijn de gerealiseerde rijtijden van treinen, wanneer deze niet gestoord worden door andere treinen op het baanvak. Hiervoor is gebruik gemaakt van de rijtijd van de 800 serie, op het baanvak tussen Utrecht Centraal en Amsterdam Bijlmer. Op dit viersporige baanvak rijden IC's gescheiden van Sprinters en goederentreinen, waardoor de IC's niet gehinderd worden door andere typen treinen. In Bijlage 8: "Bepaling verdelingen uit realisatiedata" is een verdere beschrijving van de prestatieverdeling gegeven.

Vertragingen op stations

Bij het simuleren van de dienstregeling in het model worden geen vertragingen op stations toegevoegd. Het is namelijk niet goed mogelijk om te bepalen hoe groot deze vertragingen moeten zijn. Daarvoor moeten de realisatiecijfers uitgesplitst worden naar primaire en secundaire verstoring en dat is niet goed mogelijk (zie ook 2.3.2 en Vromans, 2005).

Het ontbreken van vertragingen op stations heeft wel gevolgen voor de treinenloop. In dit onderzoek worden echter twee dienstregelingen met elkaar vergeleken, die beide geen vertragingen op stations krijgen. Daardoor zijn ze nog steeds vergelijkbaar. Door het toevoegen van ingangsvertragingen en een prestatieverdeling voor de trein, worden wel variaties toegevoegd in de treinenloop. Hierdoor zullen verschillen in de robuustheid tussen de twee dienstregelingen zichtbaar worden.

5.3 Infrastructuur

In OpenTrack is de infrastructuur van de A2-corridor gemodelleerd volgens de situatie van 2009. In Bijlage 1: "Studiegebied" is weergegeven welke stations binnen het studiegebied vallen. Bron voor de infrastructuur zijn de OBE en OS bladen die worden uitgegeven door ProRail. OBE staat voor Overzicht Baan en Emplacement. Hierin staat zeer gedetailleerd beschreven welke infrastructuur in Nederland gebouwd is. Dat betekent dat de lengte van de spoorstaven, de seinen en de wissels zijn opgenomen, maar ook borden, lassen, bovenleidingspalen, etc. OS staat voor Overzicht Seinbeelden. Op deze bladen worden per sein alle mogelijke seinbeelden weergegeven.

In OpenTrack zijn alleen de elementen opgenomen die bepalend zijn voor de treinenloop. Dit betekent dat alle spoorstaven, seinen en wissels zijn opgenomen. Wat betreft de borden zijn alleen de borden opgenomen die snelheidsbeperkingen aanduiden. Lassen zijn alleen opgenomen als ze na een sein of een wissel liggen en daarmee de scheiding tussen blokken en rijwegen aangeven. Seinbeelden zijn alleen opgenomen als ze gebruikt worden door treinen die op de A2-corridor rijden.

5.4 Parameters simulaties

Bij de uitvoering van de simulaties moet een aantal parameters vastgesteld zijn, zoals het aantal simulaties, de looptijd van de simulaties en de gebruikte tijdstap. Deze parameters worden hieronder besproken.

5.4.1 Aantal simulaties

Voor beide dienstregelingen zijn zestig simulaties uitgevoerd, ieder met een ander vertragingsscenario, ofwel random seed, voor de vertragingsverdelingen. In totaal zijn er dus honderdtwintig runs gedaan. Dit aantal van zestig is gebaseerd op de onderlinge variatie tussen de simulaties. Bij zestig runs bleek deze variatie wat betreft zowel de punctualiteitscijfers als de netwerkstabiliteitswaarden klein te zijn. Daarnaast bleken de resultaten per run als reeks voor beide dienstregelingen normaal verdeeld te zijn bij zestig runs.

Bij het uitvoeren van de simulaties zijn zestig verschillende vertragingsscenario's gebruikt; ieder scenario is bij zowel de dienstregeling met 6-6 in de spits als de standaarddienstregeling toegepast. Hierdoor zijn de resultaten van de simulaties paarsgewijs te analyseren. De scenario's zijn gedefinieerde lotingen, dus ieder verschillend scenario levert verschillende vertragingen op. Wanneer aan het model niets veranderd wordt, levert het herhalen van een simulatie met een bepaald scenario telkens dezelfde resultaten.

5.4.2 Looptijd simulaties

De simulaties zijn bedoeld om de stabiliteit van de dienstregeling gedurende een hele dag te testen, dus iedere simulatie duurt een dienstregelingsdag. Deze begint met de eerste trein van die dag en eindigt met de laatste trein; de laatste treinen van een dag kunnen op de volgende kalenderdag rijden. Daarom zijn de simulaties gestart om 4:00 uur en lopen deze door tot 4:00 uur de volgende dag.

5.4.3 Tijdstap tijdens simulatie

De standaard tijdstap die in OpenTrack gebruikt wordt, is een seconde. Door de tijdstap zo klein mogelijk te kiezen, wordt de treinloop zo continu mogelijk gesimuleerd. De simulatietijd wordt echter ook langer; het uitvoeren van een simulatie van een dienstregelingsdag met stappen van een seconde duurt ongeveer twee uur. Daarnaast is de hoeveelheid data die OpenTrack moet verwerken bij een simulatiestap van een seconde zo groot, dat het programma instabiel wordt en vaak vastloopt. Gezien deze problemen is gekeken naar de mogelijkheid om de simulaties met een tijdstap van vijf seconden uit te voeren. Een simulatie voor een dienstregelingsdag duurt dan ongeveer twintig minuten en OpenTrack heeft geen moeite met de verwerking van de data.

De verschillen tussen simulaties met verschillende tijdstappen worden veroorzaakt doordat bij een grotere tijdstap de trein sommige seinen en snelheidsborden pas later zal opmerken. Hierdoor vinden remmingen pas later plaats. In Nederland is de zichtafstand van een sein of een bord over het algemeen 250 meter. Deze parameter is ook ingevoerd in OpenTrack. Bij een snelheid van 130 km/uur, ofwel 36 meter per seconden (de hoogste maximale snelheid op de A2-corridor), heeft een machinist dus zeven seconden de tijd om een sein of bord te zien. Met een simulatiestap van vijf seconden zal het sein of bord dus altijd nog worden opgemerkt voordat de trein het gepasseerd is. Bij verdere vergroting van de simulatiestap zal dit niet meer het geval zijn.

Ook uit de praktijk blijkt dat een tijdstap van vijf seconden geen grote problemen oplevert. Om dit te bepalen is een aantal simulaties met zowel een tijdstap van een als van vijf seconden uitgevoerd. Het blijkt dat de resultaten met tijdstappen voor een en vijf seconden voor het grootste deel van de treinen vergelijkbaar zijn; de afwijking in gesimuleerde vertrek- en aankomsttijden blijft beperkt tot een aantal seconden. Bij een paar treinen is het verschil groter. Dit wordt veroorzaakt doordat de volgorde waarin treinen een rijweg reserveren, verschillend is bij de twee tijdstappen. Het effect hiervan op de totale treinenloop is echter beperkt, omdat het voornamelijk volgordewissels tussen treinen betreft. Daarnaast zullen deze effecten in de simulaties van beide dienstregelingen optreden, dus het effect zal bij vergelijken van de dienstregelingen nog verder beperkt worden. De simulaties zijn daarom uitgevoerd met tijdstappen van vijf seconden.

6 PUNCTUALITEIT

In de komende drie hoofdstukken worden de resultaten van de simulaties besproken. Het eerste hoofdstuk heeft betrekking op de punctualiteit, het tweede gaat in op de netwerkstabiliteit en het derde bespreekt de overstaphaalkans.

Voor de validatie van het model zijn de punctualiteitscijfers uit simulaties vergeleken met die uit de realisatiedata van ProRail. Naast de punctualiteit op alle stations voor alle treinen, is ook een aantal selectie hiervan opgenomen. Dit betreft:

- Punctualiteit op hoofdstations;
- Punctualiteit in de spits; en
- Punctualiteit van de 800, 10800 en 3500 series.

Tenslotte is ook een vergelijking gemaakt wanneer de grens voor een punctuele trein op drie minuten in plaats van vijf minuten is gelegd.

De significantiewaarden van alle statistische tests die in dit hoofdstuk beschreven worden, zijn gegeven in Bijlage 11: "Significantiewaarden statistische tests punctualiteit".

6.1 Bepaling punctualiteit

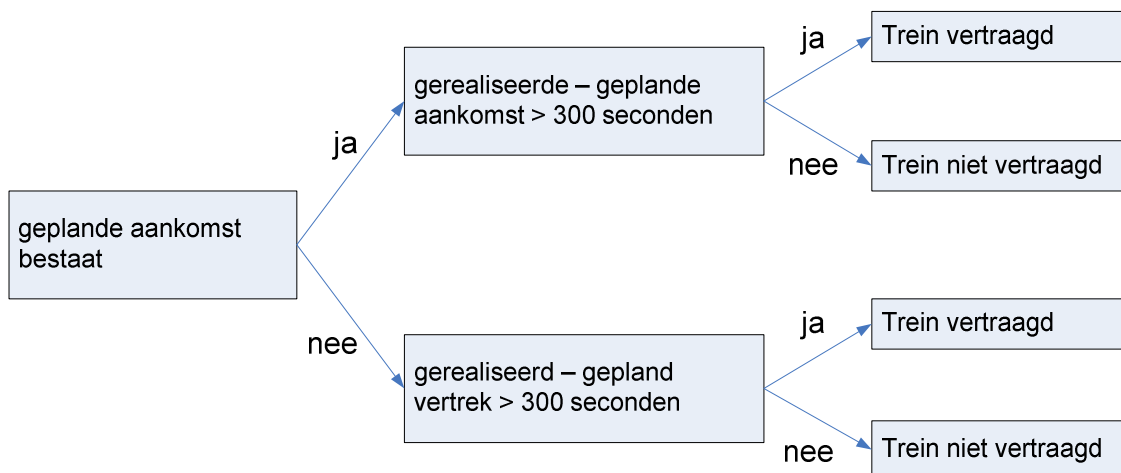
Berekening punctualiteitswaarden

De punctualiteit zoals gedefinieerd in 3.1.1 luidt als volgt:

$$Punctualiteit = \frac{\sum_s Tr_s^p}{\sum_s Tr_s} \quad (5)$$

Hierin is Tr_s^p het aantal treinen dat minder dan vijf minuten te laat arriveert op een station s en Tr_s het totaal aantal treinen dat arriveert op station s .

Om deze punctualiteit te bepalen op basis van de simulatiedata, moet een praktische voorwaarde worden gesteld. Wanneer op een station een geplande aankomst van een trein bekend is, wordt deze gebruikt om te bepalen of een trein op tijd of te laat is. Wanneer geen geplande aankomst bekend is, wordt de punctualiteit bepaald op basis van de vertrektijd. In de dienstregeling wordt bij kleinere stations namelijk gewerkt met de zogenaamde "korte stop". Dan wordt voor een stoppende trein alleen de vertrektijd gegeven. In deze gevallen is de geplande halteertijd van een trein gelijk aan de minimale halteertijd. Hierdoor zal bepalen van de punctualiteit op basis van de vertrektijd geen groot verschil opleveren in vergelijking met bepaling van de punctualiteit op basis van de aankomsttijd. In Figuur 4 is deze voorwaarde schematisch weergegeven.



Figuur 4: Schematische weergave voorwaarde voor punctualiteit

Vervolgens is het aantal treinen dat op tijd rijdt het totaal aantal treinen dat rijdt, min het aantal treinen dat vertraagd is.

6.2 Gemiddelde punctualiteit

Op basis van de gegeven voorwaarde is per vertragingsscenario de punctualiteit bepaald, voor zowel de standaarddienstregeling als de 6-6 dienstregeling. Wanneer dit gedaan wordt voor alle treinen op alle stations binnen de corridor, levert dit voor beide dienstregelingen dezelfde gemiddelde punctualiteit, namelijk 91,81 %. Ook de 95 %-betrouwbaarheidsintervallen zijn gelijk, met een ondergrens van 91,6 % en een bovengrens van 92,0 procent. De standaarddeviatie voor de standaarddienstregeling is 0,841 % en voor de 6-6 dienstregeling is deze 0,856 %. Deze resultaten voor de beide dienstregelingen liggen dus zeer dicht bij elkaar. In Tabel 4 zijn genoemde waarden samengevat. In Tabel B.6 in Bijlage 9: “Resultaten per scenario” zijn de punctualiteitswaarden per scenario gegeven.

Punctualiteit	Gemiddelde		Standaarddeviatie		95 %-Betrouwbaarheidsinterval	
	standaard	6-6	standaard	6-6	standaard	6-6
Gehele simulatie	91,81 %	91,81 %	0,841 %	0,856 %	91,6 % – 92,0 %	91,6 % – 92,0 %

Tabel 4: Samenvatting resultaatwaarden punctualiteit (1)

6.3 Vergelijking punctualiteitscijfers met realisatiedata

Naast de punctualiteit op basis van de simulatiedata, is per doordeweekse dag (dus maandag tot en met vrijdag) de punctualiteit van de realisatiedata uit november 2009 bepaald. Dit levert twintig waarden op, met een gemiddelde van 87,62 % en een standaarddeviatie van 4,88 %.

De maximale waarde voor de punctualiteit ligt met 93,22 % dicht bij de maxima uit de simulaties, respectievelijk 93,57 % en 93,35 % voor de standaarddienstregeling en de 6-6 dienstregeling. Het minimum van de realisatiedata ligt duidelijk lager dan die van de simulaties, namelijk op 76,57 % voor de realisatiedata

versus respectievelijk 89,05 % en 88,66 % voor de standaard- en de 6-6 dienstregeling. Dit verschil kan verklaard worden doordat in de realisatiedata ook grotere verstoringen kunnen voorkomen, die in de simulatie buiten beschouwing zijn gelaten. Daarnaast kunnen in werkelijkheid primaire vertragingen op stations optreden, die worden in de simulatie buiten beschouwing gelaten. De waarden zoals beschreven staan ook in Tabel 5. In Tabel B.7 van Bijlage 9: "Resultaten per scenario" zijn de punctualiteitswaarden uit de realisatiedata per dag gegeven.

<i>Punctualiteit</i>	Gemiddelde	Standaarddeviatie	Minimum	Maximum
Standaard	91,81 %	0,841 %	89,05 %	93,57 %
6-6	91,81 %	0,856 %	88,66 %	93,35 %
Realisatie	87,62 %	4,88 %	76,57 %	93,22 %

Tabel 5: Vergelijking punctualiteitswaarden simulaties met realisatiedata

Op basis van de vergelijking van punctualiteitswaarden lijkt dat de simulaties een realistisch beeld geven van de treinenloop. Hierbij geldt dat in de simulaties verstoringen van beperkte aard worden toegepast. Calamiteiten en grote verstoringen zijn buiten beschouwing gelaten, waardoor de punctualiteitswaarden uit de simulaties in de bovenste range van de punctualiteitswaarden uit de realisatiedata vallen.

6.4 Vergelijking punctualiteit per scenario

Naast een bepaling van de gemiddelde punctualiteit, zijn ook de punctualiteitscijfers per scenario met elkaar vergeleken. De punctualiteitswaarden voor de verschillende scenario's kunnen gezien worden als onderling onafhankelijke waarnemingen. Per scenario vormen de waarneming voor de 6-6 dienstregeling en voor de standaarddienstregeling een gepaarde waarneming, omdat ze gemaakt zijn op basis van hetzelfde vertragingsscenario.

Per dienstregeling is bepaald of de serie punctualiteitswaarden normaal verdeeld is. Omdat het aantal waarnemingen groter is dan 50, is dit gedaan met behulp van de Kolmogorov-Smirnov test (Innes, sd), uitgevoerd in SPSS. Hieruit blijkt dat beide series normaal verdeeld zijn. In de boxplots die van beide series punctualiteitwaarden gemaakt zijn (zie Bijlage 10: "Boxplots resultaatwaarden"), blijkt dat scenario 46 een uitschieter ("outlier") veroorzaakt, met een lagere punctualiteit. Dit is bij beide dienstregelingen het geval. In de simulatie lijkt echter geen sprake te zijn van een afwijkende situatie. De waarde wordt daarom wel meegenomen in de resultaten. Ook in werkelijkheid komen dagen voor waarop een lager punctualiteitscijfer gerealiseerd wordt.

Met behulp van de t-test voor gepaarde waarnemingen zijn in SPSS de punctualiteitswaarden met elkaar vergeleken. Ieder paar wordt daarbij gevormd door de waarde voor punctualiteit in de standaarddienstregeling en de waarde voor punctualiteit in de 6-6 dienstregeling van hetzelfde scenario. Er is er geen significant verschil tussen de twee dienstregelingen (voor de significantiewaarden zie Bijlage 11: "Significantiewaarden statistische tests punctualiteit"). Dit resultaat is ook opgenomen in de laatste kolom van Tabel 6.

Punctualiteit	Gemiddelde		Standaarddeviatie		Significant verschil
	standaard	6-6	standaard	6-6	
Gehele simulatie	91,81 %	91,81 %	0,841 %	0,856 %	Nee

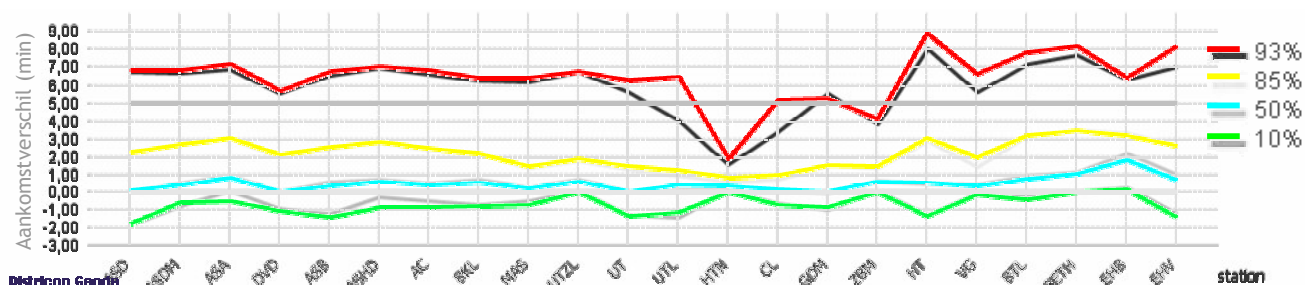
Tabel 6: Samenvatting resultaatwaarden punctualiteit (2)

Doordat in de 6-6 dienstregeling meer treinen rijden, zou de verwachting zijn dat de punctualiteit lager is. De baanvakbelasting is hoger, zodat een vertraagde trein eerder zijn vertraging zal doorgeven aan andere treinen. Dit effect blijkt, op basis van de punctualiteitscijfers zoals hierboven beschreven, niet aantoonbaar. Dit kan komen doordat in de 6-6 dienstregeling langere rijtijden en halteertijden voor sommige treinseries gehanteerd zijn. Hierdoor is de marge die treinen hebben om op tijd te rijden groter in de 6-6 dienstregeling, waardoor de verwachting van een lagere punctualiteit niet uitkomt.

6.5 Spreiding van punctualiteit over de A2-corridor

In de voorgaande paragrafen is de punctualiteit besproken aan de hand van waarden die voor de gehele corridor gelden. In deze paragraaf wordt gekeken naar de spreiding van punctualiteitswaarden over de corridor. Daarvoor wordt gebruik gemaakt van percentielgrafieken (voor een voorbeeld zie Figuur 5). Deze grafieken geven aan welk percentage van de treinen onder een bepaalde waarde liggen. Hierbij is de 6-6 dienstregeling in kleur weergegeven, met daaronder in zwart-wit de standaarddienstregeling.

In de grafiek staan op de x-as de stations die op de corridor liggen. Op de y-as staat de tijd die de gerealiseerde aankomst van een trein afwijkt van de geplande aankomst. De rode lijn, bijvoorbeeld, geeft per station aan dat in de 6-6 dienstregeling 93 % van de treinen minder dan de waarde van de lijn te laat zijn. De zwarte lijn die eronder staat, geeft deze waarde voor de standaarddienstregeling. De waarden waarop de lijn gebaseerd is, zijn bepaald per station; de verbindingslijn tussen de stations is om een indruk te geven over de ontwikkeling op de corridor. De waarden van 93 % en 85 % zijn weergegeven omdat dit de punctualiteitsnormen van de NS zijn voor respectievelijk de vijf-minuten-punctualiteit en de drie-minuten-punctualiteit.



Figuur 5: Percentielgrafiek gehele corridor voor alle treinen op alle stations; 6-6 in kleur, standaard in grijs

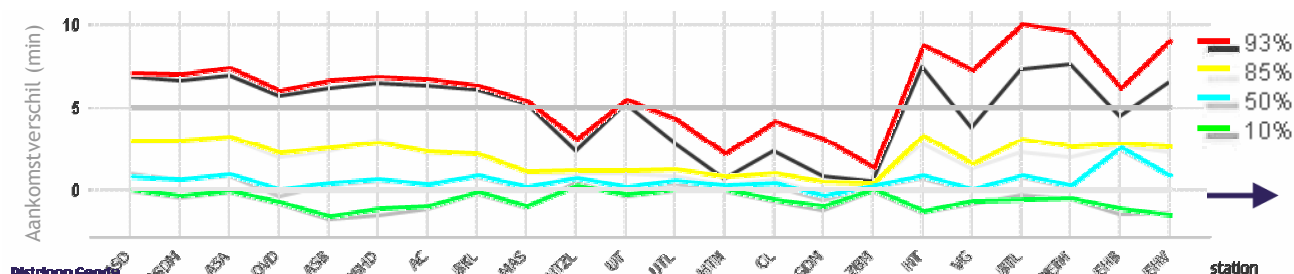
In de grafiek van Figuur 5 is te zien dat de verschillen tussen de dienstregelingen vooral in het 93^e percentiel zitten. De overige percentielen verschillen maar weinig tussen de dienstregelingen. Dit duidt erop dat treinen met een relatief grote vertraging in de 6-6 dienstregeling hun vertraging minder goed kunnen inlopen dan in de standaarddienstregeling. Kleinere vertragingen kunnen in beide dienstregelingen in dezelfde mate worden ingelopen.

De verschillen tussen de beide dienstregelingen liggen vooral aan de zuidkant van de corridor, tussen Utrecht CS (Ut) en Eindhoven (Ehv). Dit kan verklaard worden doordat het traject tussen Utrecht en 's-Hertogenbosch tweesporig is, terwijl het op de rest van de corridor grotendeels viersporig is. Daarnaast is 's-Hertogenbosch een knelpunt op de corridor, doordat op de emplacementen te weinig ruimte beschikbaar is voor in- en uitrijdende treinen. In de 6-6 dienstregeling rijden er extra treinen over de emplacementen waardoor het knelpunt versterkt wordt. In de komende jaren worden de sporen verbouwd en de emplacementen uitgebreid zodat het station geen knelpunt meer vormt in de dienstregeling.

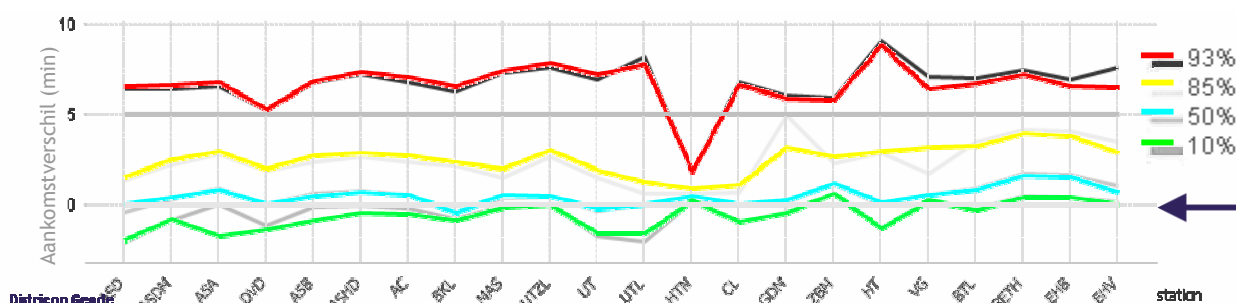
Om onderscheid te maken tussen de twee richtingen, even en oneven, is in Figuur 6 de percentielgrafiek gegeven voor alle treinen vanuit Amsterdam (Asd) richting Eindhoven (Ehv) en in Figuur 7 voor alle treinen vanuit Eindhoven richting Amsterdam. In de grafiek van Figuur 6 is hetzelfde patroon zichtbaar als bij de grafiek voor alle treinen; de verschillen tussen Utrecht CS en Eindhoven zijn zelfs nog versterkt. Dit is in tegenstelling tot de grafiek in Figuur 7, waar de verschillen tussen de twee dienstregelingen zeer beperkt blijken. Dit betekent dat de verschillen tussen de beide dienstregelingen vooral veroorzaakt worden door treinen van Amsterdam naar Eindhoven en minder door treinen van Eindhoven naar Amsterdam. Dit kan veroorzaakt worden doordat bij treinen van Amsterdam naar Eindhoven minder buffer in de dienstregeling is opgenomen.

Daarnaast blijkt het knelpunt in 's-Hertogenbosch vooral in de richting van Amsterdam naar Eindhoven aanwezig te zijn. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat bij Vught Aansluiting, de splitsing tussen het spoor naar Eindhoven en het spoor naar Tilburg (ten zuiden van 's-Hertogenbosch) slechts drie sporen beschikbaar zijn voor zowel in- als uitrijdende treinen. De kruisingen op deze sporen zijn allen gelijkvloers, waardoor treinen die station 's-Hertogenbosch naar het zuiden willen verlaten, vaak moeten wachten op treinen die uit de richting van Tilburg het station willen binnen rijden.

Opvallend in Figuur 7 is dat bij Geldermalsen (Gdm) de standaarddienstregeling een hogere waarde voor het 85^e percentiel heeft dan de 6-6 dienstregeling. Dit kan veroorzaakt worden doordat in de 6-6 dienstregeling voor de treinen van Eindhoven naar Amsterdam in Geldermalsen een goederenstop is gepland, waardoor treinen minder worden gehinderd in de doorstroming dan in de standaarddienstregeling. Bij grotere verstoringen zal een goederentrein weer mogen vertrekken voordat de vertraagde trein Geldermalsen kan verlaten, waardoor het verschil niet terugkomt in het 93^e percentiel.



Figuur 6: Percentielgrafiek voor treinen van Amsterdam richting Eindhoven; 6-6 in kleur, standaard in grijsint



Figuur 7: Percentielgrafiek voor treinen van Eindhoven richting Amsterdam; 6-6 in kleur, standaard in grijsint

6.6 Punctualiteit op hoofdstations

Zoals beschreven in 3.1.1 gebruikt de NS een andere maat voor het bepalen van de punctualiteit dan hierboven gehanteerd. Hierbij wordt alleen gemeten op de hoofdstations en worden alleen treinen die op het hoofdspoor net rijden meegenomen. In Bijlage 3: "Hoofdspoor net" is dit hoofdspoor net weergegeven. Op de A2-corridor liggen de volgende hoofdstations:

- Amsterdam Centraal
- Duivendrecht
- Utrecht
- 's-Hertogenbosch
- Eindhoven

Daarnaast is het hoofdstation Tilburg in het model opgenomen als station op een aantakking.

Volgens dezelfde voorwaarden als beschreven in 6.1 zijn ook de punctualiteitswaarden per scenario en per dienstregeling voor de hoofdstations bepaald. Dit levert de punctualiteitswaarden zoals gegeven in Tabel 7. Met de Kolmogorov-Smirnov test blijkt dat de beide reeksen voor de punctualiteit normaal verdeeld zijn.

Aangezien de datasets normaal verdeeld zijn, zijn deze onderling vergeleken met de t-test voor gepaarde waarnemingen. Hieruit blijkt dat er een significant verschil is tussen de standaarddienstregeling en de 6-6 dienstregeling.

<i>Punctualiteit</i>	Gemiddelde		Standaarddeviatie		Significant verschil
	standaard	6-6	standaard	6-6	
Gehele simulatie	91,81 %	91,81 %	0,841 %	0,856 %	Nee
Hoofdstations	90,70 %	90,27 %	1,20 %	1,28 %	Ja

Tabel 7: Samenvatting resultaatwaarden punctualiteit (3)

Het verschil tussen de punctualiteit gemeten op alle stations en de punctualiteit gemeten op de hoofdstations, kan verklaard worden doordat in de meting op de hoofdstations de treinen die werkelijk op de A2-corridor rijden, zwaarder meetellen. Dit komt doordat vijf van de zes hoofdstations direct op de A2-corridor liggen, terwijl van alle stations dit 22 van de 35 is. De 6-6 dienstregeling wordt alleen op de A2-corridor zelf gereden, waardoor het effect hiervan meer zal opvallen wanneer treinen op de corridor zwaarder meewegen.

Een andere verklaring is dat, wanneer alleen op de hoofdstations gemeten wordt, intercity's zwaarder meewegen. Dit wordt veroorzaakt doordat zowel intercity's als sprinters stoppen op de hoofdstations, maar op veel andere stations alleen sprinters stoppen. Dit wijst erop dat intercity's meer hinder ondervinden van de 6-6 dienstregeling dan sprinters en goederentreinen.

Tenslotte kan het verschil ook veroorzaakt worden door beperkingen in de doorstroom op emplacementen. Wanneer een trein het station wil binnenrijden, kan deze vertraagd worden doordat op het emplacement een rijweg voor een andere trein gereserveerd is. Dit kan ook het geval zijn als de treinen niet aan hetzelfde perron halteren. Hierdoor kan een trein te laat aankomen, waardoor de punctualiteit daalt. Deze situatie zal bij stations met een groot emplacement, zoals de hoofdstations, vaker voorkomen dan bij kleine stations. Bij haltes langs de vrije baan zal dit helemaal niet voorkomen. Wanneer dus de hoofdstations zwaarder meewegen in de punctualiteitscijfers, kunnen deze lager zijn.

Het effect van goederentreinen op het verschil in punctualiteitscijfers zal beperkt zijn, omdat deze over het algemeen een of twee stops hebben binnen de corridor en deze stops zowel op hoofdstations als andere stations zijn.

6.7 Punctualiteit tijdens de spits

Om het effect van het rijden met zes intercity's en zes sprinters per uur te benadrukken, is ook de punctualiteit bepaald voor alleen de spitsperiodes, dus ochtend- en avondspits. Hierbij is de spits gedefinieerd volgens als de treinen die de volgnummers hebben zoals weergegeven in Tabel 1. De bepaling is gedaan per scenario, voor de beide dienstregelingen, voor zowel alle stations als alleen de hoofdstations. Deze waarden zijn op dezelfde manier vergeleken als de waarden voor de gehele dag. In Tabel 8 is een samenvatting van alle hieronder genoemde waarden weergegeven.

Wanneer alle stations in de A2-corridor worden meegenomen, levert dit een gemiddelde punctualiteit van 92,01 % met een standaarddeviatie van 1,29 % voor de standaarddienstregeling. Voor de 6-6 dienstregeling is dit gemiddeld 92,11 % met een standaarddeviatie van 1,52 %. De 6-6 dienstregeling heeft dus een iets hogere waarde voor de punctualiteit tijdens de spits dan de standaarddienstregeling.

Ook deze twee reeksen van punctualiteitswaarden blijken normaal verdeeld. Op basis hiervan is wederom een t-test voor gepaarde waarnemingen uitgevoerd. Hieruit blijkt dat een verschil tussen de punctualiteitscijfers voor de beide dienstregelingen niet kan worden aangetoond.

Omdat de significantiewaarde voor de normaliteit van de 6-6 dienstregeling dicht bij de grens van 0,05 zit, is naast de t-test ook een verdelingsvrije test uitgevoerd. Hiervoor is de rangtekentest van Wilcoxon gebruikt. Hieruit blijkt dat een verschil tussen de twee dienstregelingen niet kan worden aangetoond. Het verschil dat tussen de twee dienstregelingen leek te bestaan op basis van de gemiddelden, kan dus niet statistisch worden aangetoond.

Voor de hoofdstations is de gemiddelde punctualiteit voor de standaard dienstregeling 90,89 %, met een standaarddeviatie van 1,63 %. Voor de 6-6 dienstregeling zijn deze waarden 90,04 % en 2,32 %. Volgens de Kolmogorov-Smirnov test zijn beide series punctualiteitswaarden normaal verdeeld. Uit de t-test voor gepaarde waarnemingen blijkt dat de 6-6 slechter scoort dan de standaarddienstregeling voor de punctualiteit op hoofdstations in de spits.

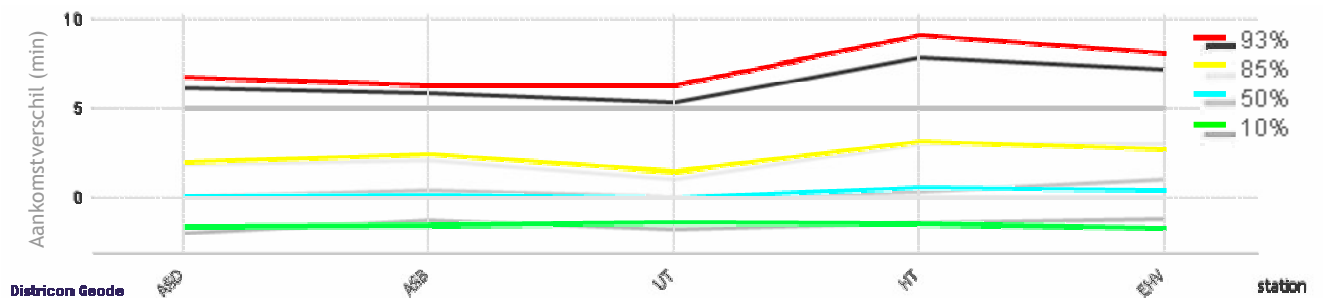
<i>Punctualiteit</i>	Gemiddelde		Standaarddeviatie		Significant verschil
	standaard	6-6	standaard	6-6	
Gehele simulatie	91,81 %	91,81 %	0,841 %	0,856 %	Nee
Hoofdstations	90,70 %	90,27 %	1,20 %	1,28 %	Ja
Spits	92,01 %	92,11 %	1,29 %	1,52 %	Nee
Hoofdstations spits	90,89 %	90,04 %	1,63 %	2,32 %	Ja

Tabel 8: Samenvatting resultaatwaarden punctualiteit (4)

De resultaten van de vergelijking tussen de punctualiteit van de twee dienstregelingen zijn vergelijkbaar voor alleen de spits en de hele dag. In beide gevallen geeft de punctualiteit bepaald over alle stations geen verschil, terwijl bij bepaling van de punctualiteit over alleen de hoofdstations wel een verschil aantoonbaar is. Dit duidt erop dat de verlaging van de punctualiteit in de 6-6 dienstregeling beperkt is. De, al kleine, verschillen zullen geen effect hebben op de uitvoering van de dienstregeling buiten de corridor, omdat zelfs wanneer alleen de spits wordt meegenomen, geen verschil wordt aangetoond over alle stations.

Daarnaast valt het op dat de gemiddelde punctualiteit hoger is als alleen gemeten wordt over de spits in vergelijking met de punctualiteit over de gehele dag. De verwachting zou zijn dat de punctualiteit lager is in de spits, omdat er dan meer reizigers zijn. Doordat vertragingen op stations niet gesimuleerd worden, valt dit effect echter weg. Daarnaast valt de ochtendspits samen met de opbouw van de dienstregeling. De eerste treinen die op een dag rijden, zullen minder kans hebben om vertraagd te worden door andere treinen in het netwerk. Wanneer dus alleen de spitsperiodes worden meegenomen, rijden er in verhouding meer treinen die geen secundaire vertraging ondervinden.

In Figuur 8 op de volgende pagina is de percentielgrafiek voor de hoofdstations in de spits voor de treinen in beide richtingen weergegeven. Hierin is te zien dat het 93^e percentiel inderdaad hoger ligt bij de 6-6 dienstregeling dan bij de standaarddienstregeling. De vorm van de grafieken is echter voor beide dienstregelingen hetzelfde. Dit duidt erop dat het verschil tussen de dienstregelingen niet veroorzaakt wordt door een knelpunt bij een specifiek station, maar over de gehele corridor verspreid ontstaat.



Figuur 8: Percentielgrafiek voor de spits, op hoofdstations; 6-6 in kleur, standaard in grijs

6.8 Punctualiteit van 800, 10800 en 3500 serie

Omdat de intercity's een grote invloed lijken te hebben op de punctualiteit, zijn de punctualiteitscijfers ook bepaald voor de 800, 10800 en 3500 serie. Dit zijn de intercityseries die samen de zes intercity's per uur leveren in de A2-corridor. Wanneer er vier intercity's per uur rijden, komen deze uit de 800 en de 3500 serie; de 10800 wordt in de 6-6 dienstregeling in de spits toegevoegd. De 800 en 10800 serie rijden door de gehele corridor. De 3500 serie rijdt tussen Eindhoven en Amsterdam Bijlmer, waarna deze afbuigt richting Schiphol. In Bijlage 4: "Treinseries" zijn verdere eigenschappen van de treinseries gegeven.

De punctualiteitswaarden voor de 800 en 3500 serie zijn wederom bepaald voor beide dienstregelingen, voor de gehele dag en voor de spits. Deze series zijn allen normaal verdeeld. In Tabel 9 zijn de waarden voor gemiddelden en standaarddeviaties te vinden. Zoals blijkt uit de tabel zijn de verschillen in gemiddelde punctualiteit bij vergelijking tussen de standaard- en 6-6 dienstregeling beperkt tot ruim een procent.

Punctualiteit	Gemiddelde		Standaarddeviatie		Significant verschil
	standaard	6-6	standaard	6-6	
Gehele simulatie	91,81 %	91,81 %	0,841 %	0,856 %	Nee
Hoofdstations	90,70 %	90,27 %	1,20 %	1,28 %	Ja
Spits	92,01 %	92,11 %	1,29 %	1,52 %	Nee
Hoofdstations spits	90,89 %	90,04 %	1,63 %	2,32 %	Ja
800 en 3500 serie	85,75 %	85,84 %	3,02 %	2,76 %	Ja
800 en 3500 serie spits	86,63 %	85,31 %	3,96 %	4,93 %	Nee (eenzijdig: ja)

Tabel 9: Samenvatting resultaatwaarden punctualiteit (5)

Het valt op dat de gemiddelde punctualiteit voor de twee intercityseries lager is dan de gemiddelde punctualiteit wanneer alle treinseries worden meegenomen. Met behulp van de t-test voor gepaarde waarnemingen blijkt inderdaad een significant verschil voor zowel de dataset van de standaarddienstregeling als die van de 6-6 dienstregeling. Dit duidt erop dat de intercity's gemiddelde meer vertraging hebben dan stoptreinen en goederentreinen.

Met de t-test voor gepaarde waarnemingen blijkt dat de waarnemingenreeks over de 800, 10800 en 3500 series van de 6-6 dienstregeling over de gehele dag significant verschilt van deze reeks in de standaarddienstregeling. Wanneer de punctualiteitscijfers voor alleen de spits vergeleken worden, kan geen significant verschil worden aangetoond. Wanneer de hypothese wordt gesteld dat de 6-6 dienstregeling een lager punctualiteitscijfer heeft dan de standaarddienstregeling, kan gewerkt worden met de eenzijdige waarde voor de significantie. In dat geval kan wel worden aangetoond dat de twee datasets niet uit dezelfde verdeling afkomstig zijn.

Het verschil tussen de twee dienstregelingen zit in de spitsperiode. Daarom is de verwachting dat wanneer alleen de spits wordt vergeleken, de verschillen tussen de twee dienstregelingen groter zijn. Volgens de vergelijkingen is dit echter niet het geval. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door het aantal waarnemingen waarop de berekening van de punctualiteit is gebaseerd. Het verschil tussen de gemiddelde punctualiteit is namelijk groter in de spits dan over de gehele dag. De standaarddeviatie van de punctualiteitswaarden is echter ook groter. Een grotere standaarddeviatie heeft tot gevolg dat de verschillen tussen twee datasets groter moeten zijn om met een bepaalde significantie te kunnen zeggen dat de twee datasets verschillend zijn.

Het verschil in standaarddeviatie komt doordat in de spits een relatief klein aantal treinen van de 800 en 3500 series rijdt. In de standaarddienstregeling zijn dit per run 50 treinen, in de 6-6 dienstregeling 75. Door dit kleine aantal treinen heeft een verschil van een trein die wel of niet punctueel is een relatief grote invloed op de punctualiteit voor de 800, 10800 en 3500 serie in de spits. Ter vergelijking, over de gehele dag rijden er 146 treinen van de 800, 10800 en 3500 series in de standaarddienstregeling en 171 treinen van de 800 en 3500 series in de 6-6 dienstregeling.

6.9 Grens voor punctuele trein bij drie minuten

Uit de resultaten voor de netwerkstabiliteit (zie hoofdstuk 7) blijkt een redelijk groot verschil te bestaan tussen de 6-6 dienstregeling en de standaarddienstregeling. Een mogelijke verklaring hiervoor zou kunnen zijn dat in de 6-6 dienstregeling meer vertragingen voorkomen, maar dat deze kleiner zijn dan vijf minuten en daardoor niet in de resultaten met betrekking tot de punctualiteit naar boven komen. Daarom zijn de punctualiteitscijfers bepaald wanneer de grens voor een punctuele trein op drie minuten na de geplande aankomst ligt. Dit is gedaan voor de beide dienstregelingen, voor zowel alle stations als alleen de hoofdstations. De grens van drie minuten is gekozen omdat de NS tot en met het jaar 2008 de punctualiteit ook bepaalde met een grens van drie minuten.

In Tabel 10 zijn de gemiddelden en de standaarddeviaties voor de punctualiteit op basis van de drie minuten grens gegeven. Hierin is te zien dat over alle stations de gemiddelde punctualiteit nagenoeg gelijk is. Tussen de hoofdstations is een groter verschil zichtbaar, van ongeveer een half procentpunt.

<i>Punctualiteit</i>	Gemiddelde		Standaarddeviatie		Significant verschil
	standaard	6-6	standaard	6-6	
Gehele simulatie	91,81 %	91,81 %	0,841 %	0,856 %	Nee
Hoofdstations	90,70 %	90,27 %	1,20 %	1,28 %	Ja
Spits	92,01 %	92,11 %	1,29 %	1,52 %	Nee
Hoofdstations spits	90,89 %	90,04 %	1,63 %	2,32 %	Ja
800 en 3500 serie	85,75 %	85,84 %	3,02 %	2,76 %	Ja
800 en 3500 serie spits	86,63 %	85,31 %	3,96 %	4,93 %	Nee
Punctualiteit 3 min	85,12 %	85,11 %	1,06 %	1,13 %	Nee
Hoofdst. punct. 3 min	84,44 %	83,97 %	1,47 %	1,59 %	Ja

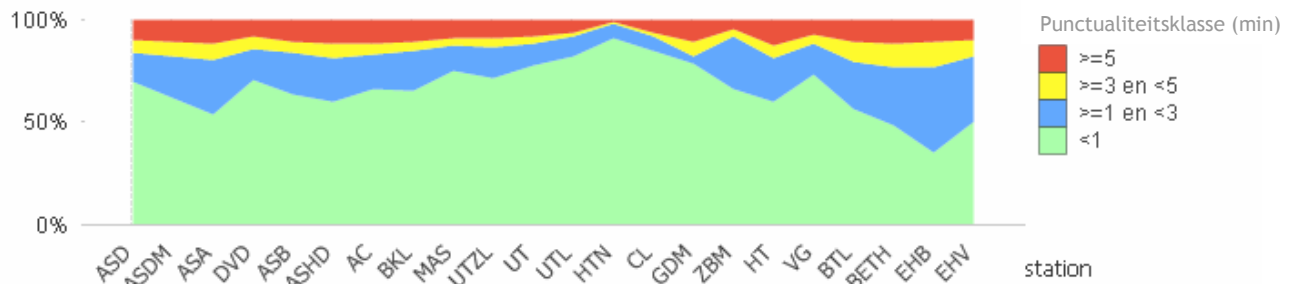
Tabel 10: Samenvatting resultaatwaarden punctualiteit (6)

De reeks punctualiteitswaarden is ook vergeleken per scenario. Volgens de Kolmogorov-Smirnov test zijn de twee datareeksen voor de punctualiteit op alle stations normaal verdeeld. De datareeksen voor de punctualiteit op de hoofdstations blijken niet normaal verdeeld.

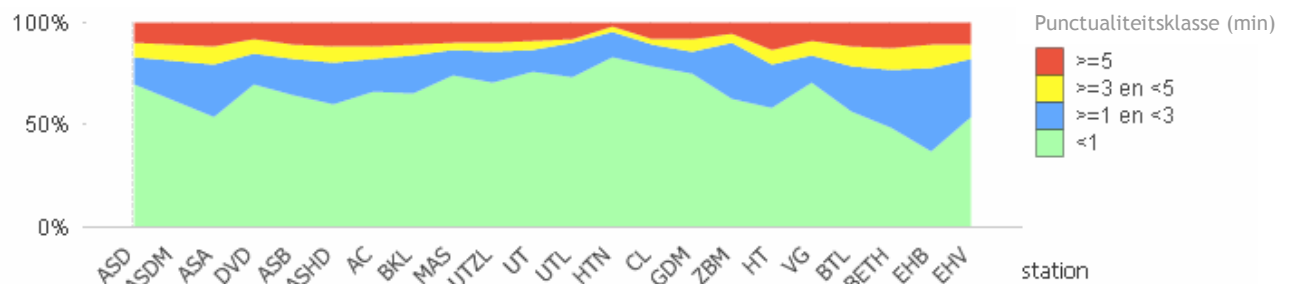
Met behulp van de t-test voor gepaarde waarnemingen blijkt dat voor de drie-minuten-punctualiteit gemeten over alle stations geen significant verschil kan worden aangetoond. Voor de drie-minuten-punctualiteit op alleen de hoofdstations blijkt met de rangtekentest van Wilcoxon wel dat er een verschil is tussen de beide dienstregelingen.

De resultaten voor de drie-minuten-punctualiteit zijn vergelijkbaar met de resultaten wanneer de punctualiteit met een grens van vijf minuten is bepaald. Dit wordt bevestigd door Figuur 9 en Figuur 10. In deze figuren is voor respectievelijk de standaarddienstregeling en de 6-6 dienstregeling aangegeven welk percentage treinen in welke punctualiteitsklasse valt. Een punctualiteitsklasse geeft aan welk percentage van de treinen een vertraging in een bepaalde tijdsklasse heeft. De grens tussen twee tijdsklassen geeft daarmee de waarde voor punctualiteit zoals in de tabel gepresenteerd.

In de twee figuren is te zien dat de vorm van de punctualiteitsklassen voor beide dienstregelingen gelijk is. Dit is in overeenstemming met de berekening voor de drie-minuten-punctualiteit. Ook wanneer de punctualiteitsgrens bij één minuut wordt gelegd, is de vorm van de grafiek gelijk. Het verder verlagen van de punctualiteitsgrens naar één minuut zal dus ook geen significante verschillen tussen de twee dienstregelingen opleveren.



Figuur 9: Punctualiteitsklassen voor de standaarddienstregeling



Figuur 10: Punctualiteitsklassen voor de 6-6 dienstregeling

Het aanpassen van de punctualiteitsgrens naar drie minuten of één minuut geeft geen verklaring voor het verschil tussen de twee dienstregelingen volgens de netwerkstabiliteit. Verdere verklaringen worden in hoofdstuk 7 besproken.

6.10 Conclusies resultaten punctualiteit

Hierboven is een aantal vergelijkingen beschreven, waarbij series van punctualiteitswaarden met elkaar vergeleken zijn. In totaal blijken de verschillen in punctualiteit tussen de standaarddienstregeling en de 6-6 dienstregeling klein, met maximale verschillen van zo'n twee procentpunt. Op basis van vergelijking van waarden uit realisatiedata met die uit simulaties, lijken de simulaties een goed beeld van de treinenloop te geven voor de gevallen waarin lichte verstoringen optreden.

Vergelijking van de 6-6 dienstregeling met de standaarddienstregeling levert geen significant verschil wanneer gemeten wordt op alle stations uit het model. De gemiddelde punctualiteit is met 91,81 % voor beide dienstregelingen gelijk. Hoewel de verwachting is dat de 6-6 dienstregeling een lagere punctualiteit heeft, blijkt dit niet het geval te zijn. Reden hiervoor kunnen langere rijtijden van treinen in de 6-6 dienstregeling zijn, zodat ze een grotere marge hebben om op tijd aan te komen.

Wanneer alleen de hoofdstations in beschouwing worden genomen is een significant verschil zichtbaar. Dit duidt erop dat intercity's een groter verschil in punctualiteit zullen kennen. Deze wegen namelijk in verhouding zwaarder mee wanneer alleen over de hoofdstations wordt gemeten.

Wanneer wordt gekeken naar verspreiding over de corridor blijken de verschillen tussen de dienstregelingen vooral tussen Utrecht en Eindhoven te liggen. Voor het traject tussen Utrecht en 's-Hertogenbosch wordt dit waarschijnlijk veroorzaakt doordat daar een relatief lang stuk dubbelspoor ligt, terwijl de overige delen van de corridor vrijwel overal viersporig zijn. Wanneer verder onderscheid wordt gemaakt naar richting, blijkt dat het verschil tussen de dienstregelingen wordt veroorzaakt door treinen van Amsterdam naar Eindhoven. Dit duidt erop dat station 's-Hertogenbosch een knelpunt is, vooral voor treinen die in de richting van Amsterdam naar Eindhoven rijden.

Vergelijking van de 6-6 dienstregeling met de standaard dienstregeling voor alleen de spitsperiode geeft een vergelijkbaar beeld als vergelijking voor de gehele dag. Het meewegen van meer treinen en stations waar geen 6-6 wordt gereden, zorgt dus dat er geen verschil zichtbaar is tussen de twee dienstregelingen. Dit lijkt erop te duiden dat een iets lagere punctualiteit van de 6-6 dienstregeling zich niet verder verspreid buiten de corridor.

Bij vergelijking van alleen de 800, 10800 en 3500 series, de intercity series die door de gehele corridor rijden, blijkt er een verschil te bestaan tussen de twee dienstregelingen. Dit verschil is echter klein.

7 NETWERKSTABILITEIT

Dit is het tweede hoofdstuk met resultaten, waarin de resultaten met betrekking tot de netwerkstabiliteit worden besproken. In het voorgaande hoofdstuk is de punctualiteit besproken, in het volgende hoofdstuk zal de overstaphaalkans behandeld worden.

7.1 Bepaling netwerkstabiliteit

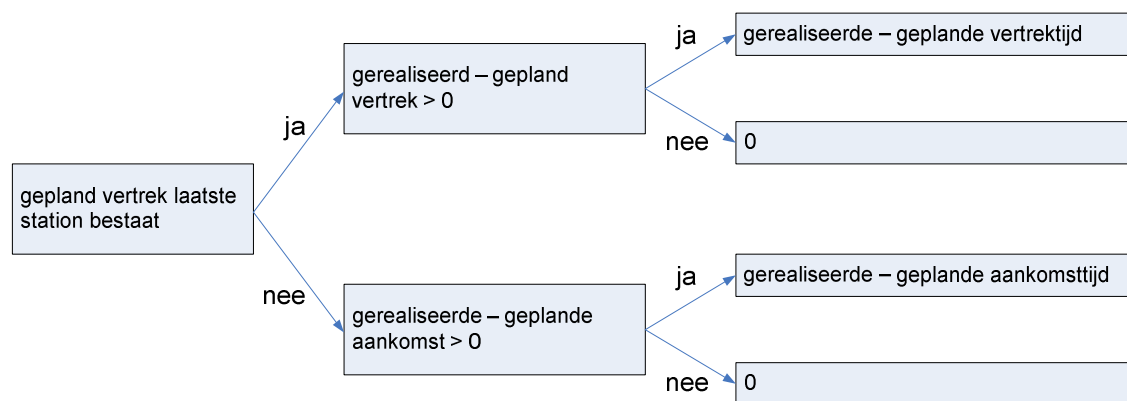
De netwerkstabiliteit zoals gedefinieerd in 3.1.2 luidt als volgt:

$$Netwerkstabiliteit = \frac{\sum_i vert_i^{uit}}{\sum_i vert_i^{in}} \quad (6)$$

Hierin is $vert_i^{in}$ de ingangsvertraging van trein i , $vert_i^{uit}$ de uitgangsvertraging van trein i . Wanneer de netwerkstabiliteit kleiner is dan 1, dempen vertragingen uit en is het netwerk stabiel, anders is het instabiel.

Om de netwerkstabiliteit te bepalen op basis van de simulatiedata zijn, vergelijkbaar met de punctualiteit, twee praktische voorwaarden gesteld. De ingangsvertraging van een trein wordt bepaald op het station waar deze in het model komt, als het werkelijke vertrek min het geplande vertrek. Deze berekening is voor iedere trein mogelijk.

De uitgangsvertraging wordt bepaald over de laatst bekende vertrek- of aankomsttijd per trein. Wanneer een trein zijn dienst eindigt binnen het model, is dit de aankomsttijd op het laatste station. Wanneer een trein zijn dienst buiten het model vervolgt, is dit de vertrektijd op het laatste station binnen het model. Dit levert de voorwaarde voor het bepalen van de uitgangsvertraging zoals weergegeven in Figuur 11.



Figuur 11: Schematische voorwaarde voor uitgangsvertraging

7.2 Gemiddelde netwerkstabiliteit

De gemiddelde netwerkstabiliteit voor de standaarddienstregeling is 0,7116, met een standaarddeviatie van 0,0258 en een 95 %-betrouwbaarheidsinterval van 0,706 – 0,719. Voor de 6-6 dienstregeling is dit 0,7592 met een standaarddeviatie van 0,0312 en een 95 %-betrouwbaarheidsinterval van 0,751 – 0,767. Beide dienstregelingen leveren dus een stabiel netwerk. De standaarddeviatie en het betrouwbaarheidsinterval duiden erop dat de resultaten over de verschillende scenario's dicht bij elkaar in de buurt liggen.

De gemiddelde netwerkstabiliteit is beter voor de standaarddienstregeling dan voor de 6-6 dienstregeling. Vertragingen die in de 6-6 dienstregeling het netwerk binnen komen, dempen dus minder snel uit dan wanneer ze in de standaarddienstregeling binnen komen. Deze waarden staan ook in Tabel 11. In Tabel B.8 in Bijlage 9: "Resultaten per scenario" zijn de waarden voor de netwerkstabiliteit per scenario weergegeven.

Netwerkstabiliteit	Gemiddelde	Standaarddeviatie	95 %-Betrouwbaarheidsinterval
Standaard	0,7116	0,0258	0,706 – 0,719
6-6 dienstregeling	0,7592	0,0312	0,751 – 0,767

Tabel 11: Samenvatting resultaatwaarden netwerkstabiliteit

Gemiddeld over alle runs en alle treinen is de ingangsvertraging ongeveer 21 seconden per trein. De gemiddelde afname van de vertraging is in de standaarddienstregeling 6,19 seconden en in de 6-6 dienstregeling 5,07 seconden.

7.3 Vergelijking netwerkstabiliteit per scenario

Naast de gemiddelde netwerkstabiliteit is ook de netwerkstabiliteit per scenario vergeleken. Net als bij de punctualiteit zijn de waarden voor de stabiliteit per dienstregeling onderling onafhankelijk. Per scenario kunnen ze gezien worden als gepaarde waarnemingen. Met de Kolmogorov-Smirnov test is met behulp van SPSS onderzocht of de waarnemingen per dienstregeling normaal verdeeld zijn. Dit blijkt voor beide dienstregelingen het geval te zijn, met een ondergrens voor de werkelijke significantie van 0,200.

Van de twee series voor de netwerkstabiliteit zijn in Bijlage 10: "Boxplots resultaatwaarden" de boxplots gegeven. Hierin is te zien dat de scenario's 40 en 47 voor zowel de 6-6 dienstregeling als de standaarddienstregeling uitschieters ("outlier") zijn, met respectievelijk een hoge en een lage waarde voor de netwerkstabiliteit. De standaarddienstregeling kent daarnaast nog een uitschieter, scenario 57 met een hoge waarde voor de netwerkstabiliteit. Deze simulaties lijken echter normaal verlopen, dus ze worden wel meegenomen in de verwerking van de data. In werkelijkheid kunnen ook dagen voorkomen waar de stabiliteit hoger of lager is.

Met de t-test voor gepaarde waarnemingen is onderzocht of de serie waarnemingen voor de 6-6 dienstregeling uit een andere verdeling afkomstig is dan de serie waarnemingen voor de standaarddienstregeling. Dit blijkt het geval te zijn, met een waarde voor de significantie van nagenoeg nul. Dit resultaat is in overeenstemming met de verwachting naar aanleiding van de gemiddelden en standaarddeviaties per serie. De 6-6 dienstregeling blijkt dus een lagere netwerkstabiliteit te hebben dan de standaarddienstregeling. Dit is in overeenstemming met het idee dat wanneer er meer treinen rijden, de mogelijkheid om vertraging te laten uitdempem afneemt.

De verschillen tussen de 6-6 dienstregeling en de standaarddienstregeling zijn, in verhouding tot de verschillen gevonden bij de punctualiteit, groot. Een mogelijke verklaring hiervoor zou kunnen zijn dat er veel kleine vertragingen optreden, die wegvallen door de grens van vijf minuten die is gesteld voor het wel of niet te laat zijn van een trein. Zoals besproken in 6.9 wordt deze verklaring echter niet bevestigd door verlaging van de punctualiteitsgrens naar drie minuten.

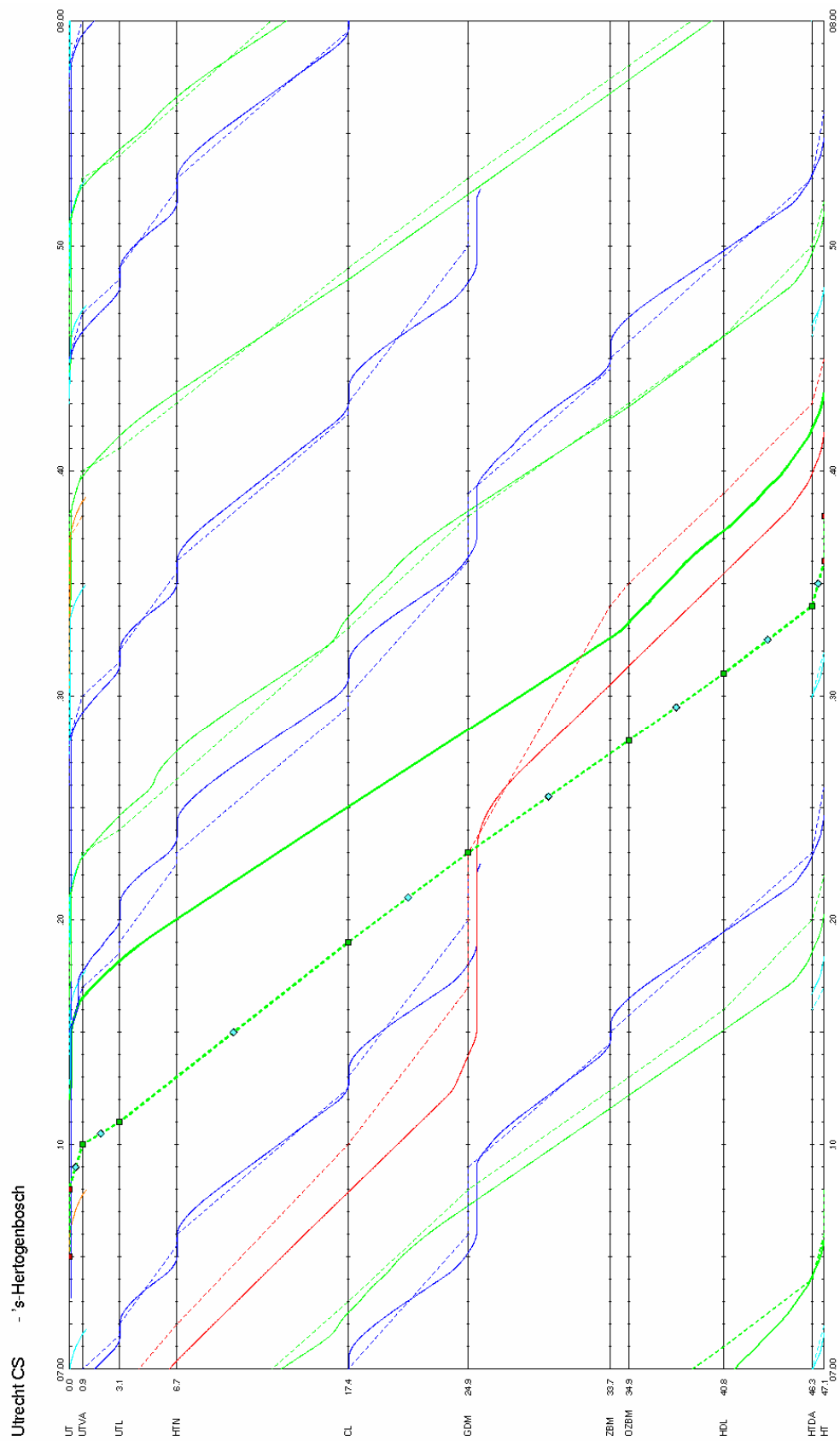
Een andere verklaring kan zijn dat een aantal treinen in de 6-6 dienstregeling juist een grotere uitgangsvertraging heeft dan in de standaarddienstregeling. Wanneer een trein een bepaalde vertraging heeft, zal deze zijn vertraging doorgeven aan andere treinen. Wanneer de vertraging van een trein groot is, kan het dat hij door wisseling van volgorde zijn vertraging pas aan latere treinen doorgeeft dan de treinen die direct na hem vertrekken. Hij moet als het ware wachten totdat er een ruimte is om bij andere treinen tussendoor te gaan. Op emplacementen zijn in verhouding veel knelpunten. Het grotere aantal treinen in de 6-6 dienstregeling kan tot meer conflicten op de emplacementen leiden. Een vertraagde trein staat dan langer op het emplacement of het station te wachten. De afname van de ingangsvertraging is dan kleiner dan bij de standaarddienstregeling en de netwerkstabiliteit dus lager. Het aantal treinen dat beïnvloed wordt, blijft echter wel gelijk, waardoor de punctualiteitscijfers geen grote verschillen laten zien.

In Figuur 12 en Figuur 13 zijn twee tijd-weg diagrammen uit OpenTrack weergegeven die het beschreven effect illustreren. In beide tijd-weg diagrammen is het traject tussen Utrecht Centraal Station en 's-Hertogenbosch tussen 7:00 en 8:00 weergegeven. Dit traject vormt een knelpunt in de corridor, omdat het tweesporig is. In beide diagrammen zijn intercity's groen, sprinters blauw en de goederentrein rood. De stippellijn is de dienstregeling, de doorgetrokken lijn de uitvoering van de simulatie. Figuur 12 geeft de standaarddienstregeling, Figuur 13 de 6-6 dienstregeling. In beide simulaties is intercity 821, van Amsterdam naar Eindhoven, met 10 minuten vertraging vertrokken. Deze trein is dikker gedrukt weergegeven. De overige treinen rijden zonder verstoring. In beide figuren is te zien dat de verstoring van trein 821 geen grote gevolgen heeft voor het rijden van de andere treinen. Het valt echter wel op dat de vertraging van trein 821 in de 6-6 dienstregeling groter is dan bij de standaarddienstregeling. De punctualiteit zal dus voor beide dienstregelingen hetzelfde zijn, maar de netwerkstabiliteit is in de 6-6 dienstregeling kleiner dan in de standaarddienstregeling.

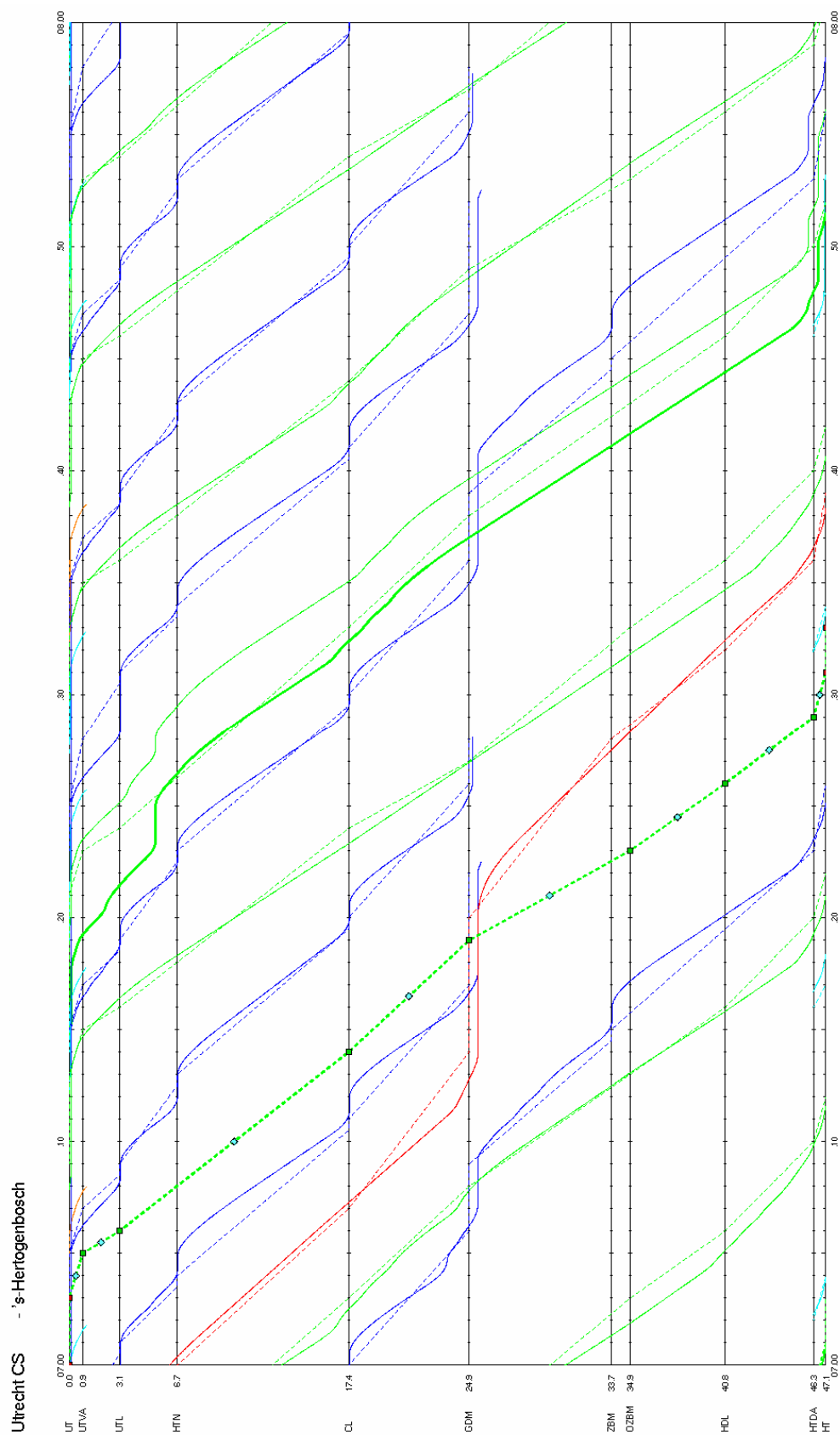
7.4 Conclusie resultaten netwerkstabiliteit

Het blijkt dat beide dienstregelingen een stabiel netwerk veroorzaken. De waarde voor de netwerkstabiliteit is hoger bij de 6-6 dienstregeling dan bij de standaarddienstregeling. Dit blijkt zowel uit vergelijking van de gemiddelde waarden als vergelijking van de twee waarden per scenario. Een hogere waarde voor de netwerkstabiliteit voor de 6-6 dienstregelingen betekent dat vertragingen die in deze dienstregeling het model binnen komen, minder snel uitdempen dan vertragingen in de standaarddienstregeling.

Volgens de resultaten voor de punctualiteit is er weinig verschil tussen de twee onderzochte dienstregelingen. De resultaten voor de netwerkstabiliteit laten wel een verschil zien. Dit lijkt veroorzaakt te worden doordat een aantal vertraagde trein in de 6-6 dienstregeling minder snel ruimte heeft om tussen de andere treinen door te gaan. Het aantal treinen waaraan de vertraagde trein zijn vertraging doorgeeft, is dan voor beide dienstregelingen wel nagenoeg gelijk. In de 6-6 dienstregeling is het hebben van vertraging voor een afzonderlijke trein dus ernstiger dan in de standaarddienstregeling, maar het doorgeven aan andere treinen is vergelijkbaar.



Figuur 12: Tijd-weg diagram Utrecht - 's-Hertogenbosch, standaarddienstregeling



Figuur13: Tijd-weg diagram Utrecht - 's-Hertogenbosch, 6-6 dienstregeling

8 OVERSTAPHAALKANS

Dit is de derde van drie hoofdstukken waarin de resultaten van de simulaties beschreven worden. In de vorige twee hoofdstukken is aandacht besteed aan de punctualiteit en de netwerkstabiliteit. Dit hoofdstuk richt zich op de overstaphaalkans.

8.1 Bepaling overstaphaalkans

De overstaphaalkans zoals gedefinieerd in 3.1.3 luidt als volgt:

$$\text{Overstaphaalkans voor relatie } ij = \frac{Tr_{ij}^h}{Tr_{ij}} \quad (7)$$

Hierin is Tr_{ij} het totale aantal treinen dat op een dag aankomt waarvoor overstap van trein i op trein j bestaat. Tr_{ij}^h is het aantal treinen waarbij de overstap gehaald wordt. Een overstap wordt gehaald als:

$$v_j - a_i - ot_{ij} > 0 \quad (8)$$

Hierin is v_j de vertrektijd van trein j , a_i de aankomsttijd van trein i en ot_{ij} de overstaptijd die nodig is voor de overstap van trein i op trein j , zoals gedefinieerd in het Spoorboekje 2009 (NS, 2008).

Voor het bepalen van de overstaphaalkans, zijn eerst de relaties bepaald waarvan de aankomende trein in de 6-6 dienstregeling zes keer per uur rijdt op de A2-corridor en de vertrekkende trein maximaal eens per half uur rijdt. Deze zijn:

- Eindhoven – intercity richting Enschede/Groningen/Leeuwarden, met overstap in Utrecht;
- Eindhoven – intercity richting Nijmegen, met overstap in 's-Hertogenbosch;
- Eindhoven – sprinter richting Nijmegen, met overstap in 's-Hertogenbosch;
- Utrecht – sprinter richting Nijmegen, met overstap in 's-Hertogenbosch;
- 's-Hertogenbosch – intercity richting Venlo, met overstap in Eindhoven;
- 's-Hertogenbosch – sprinter richting Deurne, met overstap in Eindhoven; en
- Utrecht – sprinter richting Leerdam met overstap in Geldermalsen.

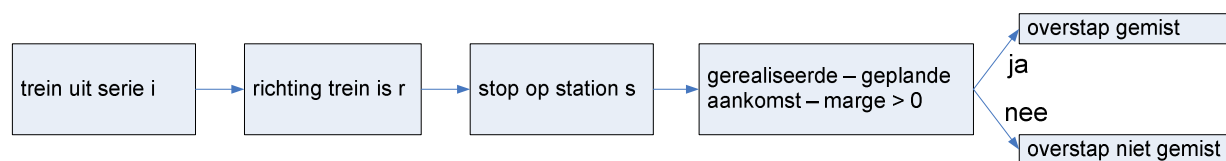
In Tabel 12 zijn verdere details van de relaties weergegeven. Hierin is geeft de kolom “nodig” de benodigde overstaptijd volgens het spoorboekje 2009 (NS, 2008). De aankomende trein is de trein van waaruit de overstap plaatsvindt volgens de standaarddienstregeling en tijdens de dalperioden van de 6-6 dienstregeling. Aankomende trein 6-6 spits heeft betrekking op de overstap wanneer in de 6-6 dienstregeling de treinen daadwerkelijk 6-6 rijden (voor de treinnummers waarvoor dit geldt, zie Tabel 1). De marge geeft de speelruimte die een overstappende reiziger heeft. Deze bestaat uit het verschil tussen aankomst van de aankomende trein en vertrek van de vertrekkende trein min de benodigde overstaptijd. Ofwel, als de trein meer dan de marge te laat aankomt, zal de overstap gemist worden, ervan uitgaande dat de vertrekkende trein op tijd rijdt.

Reis	Overstap		Aankomende trein		Aankomende trein 6-6 spits		Vertrekkende trein
	Station	Nodig	Serie	Marge	Serie	Marge	Serie
Eindhoven - Enschede/ Groningen/Leeuwarden	Utrecht	5 min	3500 even	8 min	3500 even	8 min	1700 oneven
Eindhoven - Nijmegen	's-Hertogenbosch	4 min	3500 even	6 min	3500 even	6 min	3600 even
Eindhoven - Nijmegen	's-Hertogenbosch	4 min	800 even	2 min	800 even	7 min	9600 even
Utrecht - Nijmegen	's-Hertogenbosch	4 min	3500 oneven	2 min	3500 oneven	1 min	9600 even
's-Hertogenbosch - Venlo	Eindhoven	2 min	800 oneven	2 min	800 oneven	8 min	1900 oneven
's-Hertogenbosch - Deurne	Eindhoven	4 min	800 oneven	16 min	10800 even	8 min	9600 oneven
Utrecht - Leerdam	Eindhoven	2 min	16000 oneven	11 min ²	16000 oneven	10 min ²	32500 even

Tabel 12: Eigenschappen overstaprelaties

Om de overstaphaalkans te bepalen uit de simulatiedata, is per overstaprelatie een voorwaarde opgesteld voor het bepalen van het aantal treinen waarmee de overstap gemist wordt. Hierbij is als uitgangspunt genomen dat de vertrekkende trein op tijd vertrekt. Dit zal in werkelijkheid ook gebeuren, omdat de overstaprelaties geen gegarandeerde aansluitingen bevatten. Dit betekent dat niet in de dienstregeling is vastgelegd dat de vertrekkende trein op de aankomende trein moet wachten.

De voorwaarde selecteert voor een treinserie, voor een richting (even of oneven) op een station het aantal treinen dat een werkelijke aankomst heeft die meer dan de marge later is dan de geplande aankomst. Voor de overstaprelatie van treinserie i , met richting r op station s met marge m geldt dan de voorwaarde zoals weergegeven in Figuur 14.



Figuur 14: Schematische weergave voorwaarde gemiste overstap

Vervolgens is het aantal overstappen dat gehaald wordt, het aantal overstappen dat mogelijk is op een dag, min het aantal overstappen dat gemist wordt.

² Deze marge is groter dan volgens de dienstregeling, maar de 32500 even treinen moeten station Geldermalsen via het linker spoor verlaten, over het spoor waar de 16000 oneven treinen aankomen. De 16000 trein heeft dus een grote vertraging nodig om een volgordewissel mogelijk te maken.

8.2 Gemiddelde overstaphaalkans

Volgens bovenstaande voorwaarde is per scenario de overstaphaalkans berekend. In Tabel 13 is voor alle overstaprelaties het gemiddelde en de standaarddeviatie van de overstaphaalkans gegeven, voor zowel de 6-6 als de standaarddienstregeling. In de laatste kolom is de gemiddelde haalkans van de standaarddienstregeling van de gemiddelde haalkans van de 6-6 dienstregeling afgetrokken. Wanneer hier een positief getal staat, is de kans dus groter om de overstap te halen met de 6-6 dienstregeling; als er een negatief getal staat is de kans groter met de standaard dienstregeling.

Overstaphaalkans Reis	Overstapstation	Standaard		6-6		Verschil in gem (6-6 – standaard)
		Gem	St.dev.	Gem	St.dev.	
Eindhoven - Enschede/ Groningen/Leeuwarden	Utrecht	83,3 %	5,7 %	84,3 %	5,0 %	1,0 %
Eindhoven - Nijmegen	's-Hertogenbosch	89,0 %	6,0 %	87,1 %	7,3 %	- 1,9 %
Eindhoven - Nijmegen	's-Hertogenbosch	75,7 %	7,7 %	76,7 %	6,3 %	1,0 %
Utrecht - Nijmegen	's-Hertogenbosch	86,2 %	6,9 %	82,4 %	7,8 %	- 3,8 %
's-Hertogenbosch - Venlo	Eindhoven	66,2 %	8,4 %	73,6 %	7,2 %	7,4 %
's-Hertogenbosch - Deurne	Eindhoven	96,4 %	3,7 %	90,1 %	4,6 %	- 6,3 %
Utrecht - Leerdam	Eindhoven	100 %	0 %	99,4 %	1,2 %	- 0,6 %

Tabel 13: Overstaphaalkans per scenario

Zoals blijkt uit de tabel, blijven de verschillen in de overstaphaalkans beperkt tot een paar procentpunt. Daarnaast verschilt het per relatie welke dienstregeling het best presteert. Dit betekent dat de robuustheid van de ene dienstregeling op basis van gemiddelde overstaprelaties niet per definitie beter is dan die van de andere dienstregeling.

De verschillen tussen de twee dienstregelingen worden niet alleen veroorzaakt door hun uitvoering, maar ook door verschillen in de marge die beschikbaar is voor de overstappen. Een grotere marge betekent echter ook dat een reiziger eerder op het overstapstation is, en dus eerder bij zijn herkomst heeft moeten vertrekken. Dit effect veroorzaakt het grote verschillen bij de relaties tussen 's-Hertogenbosch en Venlo en 's-Hertogenbosch en Deurne. De marge voor de overstap is bij deze relaties in de ene dienstregeling groter dan in de andere.

Naast de verschillen in gemiddelde, valt op dat de verschillen in standaarddeviatie redelijk groot zijn in vergelijking met de standaarddeviaties voor de andere robuustheidseenheden. Dit wordt veroorzaakt doordat de overstaphaalkans gebaseerd is op een klein aantal treinen per run. Namelijk de treinen van een bepaalde serie, in een bepaalde richting. Per run zijn er per relatie ongeveer 35 overstappen op basis waarvan de overstaphaalkans berekend is.

De overstaphaalkans is gebaseerd op de aanname dat de vertrekkende trein op zijn geplande tijd vertrekt. In werkelijkheid kan deze trein echter ook te laat vertrekken, waardoor de kans om hem te halen groter is. De waarden voor de overstaphaalkans zoals ze hier staan, vormen daarmee dus een ondergrens voor de werkelijke overstaphaalkans.

8.3 Vergelijking overstaphaalkans per scenario

Net als bij de punctualiteit en de netwerkstabiliteit, kan de overstaphaalkans ook vergeleken worden per scenario. Uit de Kolmogorov-Smirnov test blijkt, met behulp van SPSS, dat alleen de serie waarden voor de 6-6 dienstregeling en de relatie tussen Eindhoven en de sprinter naar Nijmegen normaal verdeeld is. De waarde voor de significantie hierbij is 0,061. De overige series wijken significant af van de normale verdeling. Daarom is de vergelijking voor de overstaphaalkans gedaan met een verdelingsvrije test, namelijk de rangtekentest van Wilcoxon. Hierbij zijn de rangen bepaald volgens 6-6-dienstregeling min standaarddienstregeling. De resultaten van de test zijn weergegeven in Tabel 14.

Overstaphaalkans	Overstapstation	Significantie waarde (vet is significant)	Z-waarde	Overstaphaalkans groter bij
Reis				
Eindhoven - Enschede/ Groningen/Leeuwarden	Utrecht	0,011	-2,533	6-6
Eindhoven - Nijmegen	's-Hertogenbosch	0,262	-1,122	Standaard
Eindhoven - Nijmegen	's-Hertogenbosch	0,248	-1,156	6-6
Utrecht - Nijmegen	's-Hertogenbosch	0,000	-3,835	Standaard
's-Hertogenbosch - Venlo	Eindhoven	0,000	-5,287	6-6
's-Hertogenbosch - Deurne	Eindhoven	0,000	-4,162	Standaard
Utrecht - Leerdam	Eindhoven	0,001	-3,464	Standaard

Tabel 14: Vergelijking dienstregelingen per overstaprelatie

De twee relaties tussen Eindhoven en Nijmegen laten geen significant verschil zien tussen de 6-6 dienstregeling en de standaarddienstregeling. De overige relaties laten wel een significant verschil zien. Van deze overstaprelaties presteert in twee gevallen de 6-6 dienstregeling beter en in drie gevallen de standaard dienstregeling. De beide dienstregelingen lijken dus vergelijkbaar te presteren op het gebied van overstaprelaties.

8.4 Conclusie resultaten overstaphaalkans

Op basis van de gemiddelde overstaphaalkans over alle scenario's presteert de 6-6 dienstregeling voor drie relaties beter en de standaarddienstregeling voor vier relaties. Op basis van vergelijking per scenario blijkt een significant verschil bij vijf van de zeven relaties, waarbij er twee beter presteren met de 6-6 dienstregeling en drie met de standaarddienstregeling. Op basis van deze resultaten kan niet geconcludeerd worden dat een van de twee dienstregelingen beter scoort voor de overstaphaalkans. Wel moet opgemerkt worden dat verschillen tussen de twee dienstregelingen niet alleen veroorzaakt worden door de uitvoer van de dienstregeling, maar ook het gevolg zijn van andere beschikbare overstaptijden.

9 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

In dit hoofdstuk zullen eerst de deelvragen en de hoofdvraag van het onderzoek beantwoord worden, waarmee de conclusies van het onderzoek beschreven zijn. Vervolgens wordt een aantal aanbevelingen gedaan.

9.1 Conclusies

Op basis van het hierboven beschreven onderzoek, kan antwoord gegeven worden op de in hoofdstuk 1 geformuleerde deelvragen. Dit leidt tot beantwoording van de gestelde onderzoeksvraag:

In welke mate verandert de robuustheid van een treindienstregeling als in de spits met een hogere frequentie wordt gereden?

De drie deelvragen zijn hieronder herhaald, met daarbij de conclusies zoals die volgen uit het onderzoek.

Hoe kan de robuustheid van een dienstregeling worden gekwantificeerd?

In het onderzoek zijn verschillende mogelijkheden benoemd om de robuustheid van een dienstregeling te kwantificeren. Uiteindelijk is hiervan een drietal waarden gekozen en als grootheid gebruikt. Het betreft de punctualiteit, de netwerkstabiliteit en de overstaphaalkans.

De punctualiteit is een maat die kijkt naar alle treinstops op alle stations en daar een binair oordeel over geeft. Daarmee is eenvoudig inzicht te geven in het aantal vertraagde treinen binnen een dienstregeling. De netwerkstabiliteit kent een ratio schaal en neemt de grootte van de vertragingen mee. Er wordt alleen bij het binnenkomen en verlaten van het model gekeken naar de vertragingen, waardoor de uitvoering van de dienstregeling binnen het model als black box gezien kan worden. De overstaphaalkans geeft een extra dimensie aan de robuustheid van de dienstregeling doordat ook de reiziger betrokken wordt. De combinatie van aantal vertraagde treinen, grootte van vertragingen en effect voor de reiziger levert een geschikte kwantificering van robuustheid.

Het blijkt dat het mogelijk is met simulatie de kwantitatieve verschillen tussen dienstregelingen aan te tonen. Bij vergelijking tussen punctualiteitswaarden uit realisatiedata en simulatiedata blijken de maximale punctualiteitswaarden in dezelfde range te liggen. Dit duidt erop dat simulatie de werkelijkheid goed nabootst wanneer verstoringen van beperkte aard worden toegepast.

In hoeverre bestaat er een verschil in robuustheid tussen de standaarddienstregeling en de dienstregeling met hogere frequenties in de spits?

Wat betreft de punctualiteit blijkt dat er kleine verschillen tussen de 6-6 dienstregeling en de standaarddienstregeling zijn, waarbij de standaarddienstregeling een hogere punctualiteit heeft. Deze verschillen zijn slechts aantoonbaar wanneer de punctualiteit alleen over hoofdstations wordt bepaald. Dit lijkt erop te wijzen dat intercity's een grotere invloed hebben op de verschillen in punctualiteit dan sprinters. Verder zijn de verschillen tussen de twee dienstregelingen groter tussen Utrecht en Eindhoven dan tussen Amsterdam en Utrecht. Dit verschil wordt voornamelijk veroorzaakt door treinen die in de richting van Amsterdam naar

Eindhoven rijden. De oorzaak is waarschijnlijk de tweesporigheid tussen Utrecht en 's-Hertogenbosch en het emplacement van 's-Hertogenbosch bij het uitrijden aan de zuidkant. Wanneer de punctualiteit alleen voor de spits wordt vergeleken, is ook slechts een verschil tussen de dienstregelingen aantoonbaar wanneer alleen de hoofdstations worden meegenomen. Dit duidt erop dat de verschillen die er zijn tussen de twee dienstregelingen klein zijn en zich beperkt of niet buiten de corridor verspreiden.

De waarde voor de netwerkstabiliteit is voor de standaarddienstregeling hoger dan voor de 6-6 dienstregeling. Dit duidt erop dat vertragingen in de 6-6 dienstregeling minder gedempt worden dan in de standaarddienstregeling.

Uit de overstaphaalkans kan niet worden afgeleid dat een van de twee dienstregelingen beter presteert dan de andere. Voor drie van de zeven overstaprelaties scoort de standaarddienstregeling beter, voor twee relaties de 6-6 dienstregeling en voor de laatste twee relaties is een verschil niet significant aantoonbaar. Overigens worden deze verschillen niet alleen veroorzaakt door verschillen in de robuustheid van de dienstregelingen, maar ook door verschillen in de dienstregelingen op zich.

Welke van de twee dienstregelingen is robuuster?

De standaarddienstregeling scoort voor één van de drie waarden voor robuustheid, namelijk netwerkstabiliteit, beter dan de 6-6 dienstregeling. Voor de andere twee waarden is het onbeslist. Wat betreft de punctualiteit kan wel een verschil aangetoond worden, maar dan alleen als op de hoofdstations gemeten wordt en niet op alle stations, zoals punctualiteit in dit hoofdstuk geformuleerd is. Het blijkt dus dat de standaarddienstregeling robuuster is dan de 6-6 dienstregeling. De verschillen zijn echter klein.

De beantwoording van de hoofdvraag luidt als volgt: de robuustheid van een treindienstregeling vermindert als in de spits met een hogere frequentie wordt gereden. Deze vermindering is echter klein en niet op voor alle robuustheidsparameters aantoonbaar.

Uiteraard zijn de wenselijkheid en uitvoerbaarheid van rijden met een 6-6 dienstregeling van veel meer factoren afhankelijk dan alleen de robuustheid van de dienstregeling. Maar op basis van bovenstaand onderzoek lijkt gesteld te kunnen worden: Vaker een trein, da's pas fijn!

9.2 Aanbevelingen

In dit onderzoek is alleen gekeken naar de robuustheid van een bepaalde dienstregeling in een bepaalde corridor. Om algemene uitspraken te kunnen doen over dienstregelingen met een hogere frequentie in de spits, zullen meerdere corridors onderzocht moeten worden. Ook kunnen er veranderingen aan de dienstregeling worden gedaan. Deze zal dan opnieuw onderzocht moeten worden.

In de maand september van 2010 zal opnieuw een proef met de 6-6 dienstregeling op de A2-corridor gehouden worden. Omdat de proef ditmaal gedurende een maand gehouden zal worden, is de verwachting dat meer verstoringen zullen optreden dan tijdens de proef in week 36 van 2009. Het is daarom interessant om de data van de proef te vergelijken met de resultaten van dit onderzoek. Daarbij moet wel rekening worden gehouden met het feit dat in de nieuwe proef in 2010 met een andere dienstregeling gereden gaat worden dan in week 36 van 2009 het geval was.

Het effect van de 6-6 dienstregeling op en voor de reiziger is in dit onderzoek slechts beperkt meegenomen. In verder onderzoek kan gekeken worden naar het effect van de 6-6 dienstregeling op de kwaliteit van reizen. Hierbij zouden naast overstappen ook factoren als wachttijd, directe aansluitingen en totale reistijd meegenomen kunnen worden. Daarnaast kan onderzocht worden of verhogen van de frequentie reizen met de trein aantrekkelijker maakt en daarmee resulteert in een verhoging van het aantal reizigers.

Station 's-Hertogenbosch heeft beperkte capaciteit voor in- en uitrijden van het station. Vooral de capaciteit van de Vught Aansluiting, waar het spoor richting Eindhoven en het spoor richting Tilburg splitsen ten zuiden van het station, blijkt een knelpunt voor treinen die de richting van Amsterdam naar Eindhoven rijden. Aanpassing van de emplacementen bij station 's-Hertogenbosch en met name de zuidzijde kan dit knelpunt verminderen. Hierdoor zal de robuustheid van met name de 6-6 dienstregeling, maar ook de standaarddienstregeling, toenemen.

Goederentreinen zijn in de dienstregeling over het algemeen ruim ingepland. Hoewel de simulaties zijn uitgevoerd met het maatgevende materieel per goederenpad, rijden de goederentreinen vaak een aantal minuten sneller dan nodig volgens hun dienstregeling. Hierdoor lopen ze vaak onnodig tegen een geel of rood sein aan. Het gevolg hiervan is dat ze langer in de corridor zijn dan nodig, waardoor ze meer overlast kunnen veroorzaken voor andere treinen. De verwachting is daarom dat strakker geplande goederentreinen een positief effect hebben op de robuustheid van de dienstregeling.

Een andere aanbeveling met betrekking tot goederentreinen is het laten doorrijden hiervan. In de onderzochte 6-6 dienstregeling worden goederentreinen tussen Amsterdam en Eindhoven stil gezet op drie stations, namelijk Utrecht, Geldermalsen en Den Bosch. Dit is nodig in de dienstregeling doordat de rijtijd van de goederentreinen bepaald wordt aan de hand van het langzaamste materieel, met daarbovenop een marge. Vaak wordt een goederenpad echter door lichter materieel benut. Het is dan mogelijk om een goederentrein minder vaak of zelfs niet te laten stoppen binnen de corridor. Dit betekent dat bij het toewijzen van goederenpaden rekening gehouden moet worden met het materieel dat er gaat rijden. Hierdoor kunnen goederentreinen het traject sneller afleggen, wat aantrekkelijk is voor de goederenvervoerder. Daarnaast levert het een energiebesparing op, doordat de treinen minder vaak na een stop weer op gang hoeven te komen.

In het huidige onderzoek is uit gegaan van een dienstregeling waarin gepland is op minuten. Door te plannen met tijdsperiodes van 10 tot 15 seconden is het wellicht mogelijk de robuustheid van de dienstregeling te vergroten. Wanneer er iedere vijf minuten een trein over een bepaald baanvak rijdt (per tien minuten een sprinter en per tien minuten een intercity) is een planning op minuten erg grof. Door deze planning te verfijnen zouden conflicten op aansluitingen en emplacementen wellicht verminderd kunnen worden. De robuustheid van de 6-6 dienstregeling zou hierdoor toe kunnen nemen.

Uitgangspunt in het onderzoek is dat treinen klokvast rijden. Dit betekent dat ze pas uit het station mogen vertrekken als hun vertrektijd is aangebroken. Het idee van de 6-6 dienstregeling is echter dat reizigers naar het station komen zonder rekening te houden met de vertrektijd, maar er op rekenen dat er binnen tien minuten een trein komt. In dit kader zou rijden op regelmaat (een vaste tijd tussen het vertrek van twee treinen) beter passen dan klokvast rijden. Door te sturen op regelmaat zullen vertragingen op een andere manier gedempt worden in de dienstregeling. Hierdoor zal ook de robuustheid van de 6-6 dienstregeling kunnen toenemen.

10 BRONVERMELDING

Carey, M. (1992), "Reliability of interconnected scheduled services", *European Journal of Operational Research*, 79, pagina 51-72.

Goverde, R.M.P. (2005), *Punctuality of Railway Operations and Timetable Stability Analysis*, TRAIL Thesis Series no. T2005/10, Netherlands TRAIL Research School for Transport, Delft University, Delft.

Goverde, R.M.P. (2007), "Railway timetable stability analysis using max-plus system theory", *Transportation Research Part B: Methodological*, 41:2, pagina 179-201.

Goverde, R.M.P. (2008), "Timetable Stability Analysis", in: Hansen, I.A., Pachl, J. (redactie) (2008), *Railway Timetable & Traffic*, Eurailpress, Hamburg.

Haighton, M. (2009), "Trein mag vijf minuten te laat zijn", *Volkskrant*, 30 juni 2009, via http://www.volkskrant.nl/archief_gratis/article1262640.ece/Trein_mag_vijf_minuten_te_laet_zijn, gezien 22 februari 2010.

Huerlimann, D. (sd), *OpenTrack, Simulation of Railway Networks, short description*, OpenTrack Railway Technology Ltd., Zurich.

Huerlimann, D., Nash, A.B. (2010), *OpenTrack, Simulation of Railway Networks*, Version 1.6, OpenTrack Railway Technology Ltd. and ETH Zurich, Zurich.

Innes, P. (sd), *Testing & Fixing for Normality*, UQ Business School, Queensland

Jia, W., Mao, B., Liu, H., Chen, S., Ding, Y. (2008), "Service Robustness Analysis of Trains by a Simulation Method", in: Mao, B., Tian, Z., Huang, H., Gao, Z. (redactie) (2008), *Traffic and Transportation Studies: Proceedings of the Sixth International Conference on Traffic and Transportation Studies*, ASCE & T&DI, Reston.

Kroon, L., Huisman, D., Maróti, G. (2008), "Optimisation Models for Railway Timetabling", in: Hansen, I.A., Pachl, J. (redactie) (2008), *Railway Timetable & Traffic*, Eurailpress, Hamburg.

Law, A.M., Kelton, W.D. (2000), *Simulation modeling and analysis*, McGraw-Hill, derde editie, Chichester.

Martin, U. (2008), "Performance Evaluation", in: Hansen, I.A., Pachl, J. (redactie) (2008), *Railway Timetable & Traffic*, Eurailpress, Hamburg.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat (sd), *Programma Hoogfrequent Spoorvervoer*, via http://www.verkeerenwaterstaat.nl/onderwerpen/openbaar_vervoer/ambities_op_het_spoor/programma_hoogfrequent_spoorvervoer/, gezien 14 januari 2010.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2000), *Nota Mobiliteit*, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Den Haag.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2006), *Dienstregeling 2007*, via http://www.verkeerenwaterstaat.nl/Images/br.3540_tcm195-170410.pdf, gezien 24 februari 2010.

NS (2008), *Spoorboekje 2009*, Nederlandse Spoorwegen, Utrecht.

NS Reizigers, Koninklijk Nederlands Vervoer, ProRail (2009), *Evaluatie proefweek 'elke 10 minuten een trein'*, NSR, Utrecht.

Poort, J.P. (2002), *Grenzen aan benutting*, NYFER, Breukelen.

ProRail (2008a), *Ruimte op de rails*, via http://www.prorail.nl/ruimteopderails/Documents/ruimteopderails_opgemaakt.pdf, gezien op 13 januari 2010.

ProRail (2008b), *Programma Hoogfrequent Spoorvervoer Verkenning benodigd investeringsvolume*, ProRail, Utrecht.

ProRail (2009), *Prorail in 2008*, ProRail, Utrecht.

ProRail (sd), *Incidentmanagement*, via <http://www.prorail.nl/Overheden/Pages/Incidentmanagement.aspx>, gezien op 8 juni 2010.

Swiss Federal Institute of Technology (sd), *Object oriented modeling in railways*, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich.

Vromans, M., Dekker, R., Kroon, L. (2004), "Reliability and heterogeneity of railway services", *European Journal of Operational Research*, 172-2, pagina 647-6-65.

Vromans, M.J.C.M. (2005), *Reliability of Railway Systems*, TRAIL Thesis Series no. T2005/7, Netherlands TRAIL Research School for Transport, ERIM Ph.D series Research in Management 62, Erasmus Research Institute of Management (ERIM), Erasmus University Rotterdam, Rotterdam.

Yuan, J. (2006), *Stochastic Modeling of Train Delays and Delay Propagation in Stations*, TRAIL Thesis Series no. T2006/6, Netherlands TRAIL Research School for Transport, Delft University, Delft.

BIJLAGE 1: “STUDIEGEBIED”

In Tabel B.1 zijn alle stations weergegeven die op de A2-corridor liggen. In Tabel B.2 zijn de stations weergegeven die het einde van de aan- en aftakkingen van de A2-corridor vormen.

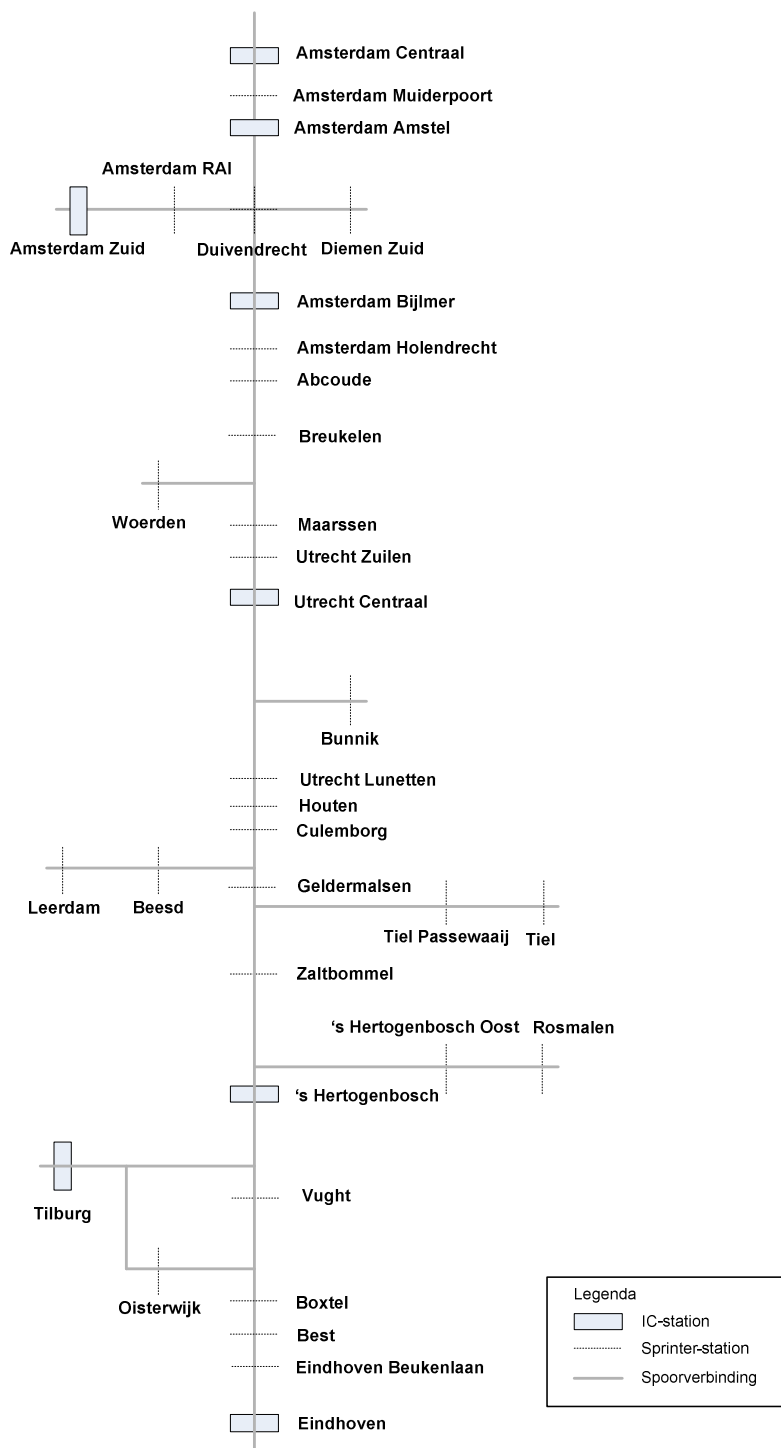
Station	Afkorting
Amsterdam - Centraal	Asd
Amsterdam Muiderpoort	Asdm
Amsterdam Amstel	Asa
Duivendrecht	Dvd
Amsterdam Bijlmer	Asb
Amsterdam Holendrecht	Asdh
Abcoude	Ac
Breukelen	Bkl
Maarssen	Mas
Utrecht Zuilen	Utzl
Utrecht Centraal	Ut
Utrecht Lunetten	Utl
Houten	Htn
Culemborg	Cl
Geldermalsen	Gdm
Zaltbommel	Zbm
's Hertogenbosch	Ht
Vught	Vg
Boxtel	Btl
Best	Bet
Eindhoven Beukenlaan	Ehb
Eindhoven	Ehv

Tabel B.1: Stations op de A2-corridor

Station	Afkorting
Diemen Zuid	Dmnz
Amsterdam Rai	Rai
Amsterdam Zuid	Asdz
Woerden	Wd
Bunnik	Bnk
Beesd	Bsd
Leerdam	Ldm
Tiel Passewaaij	Tpsw
Tiel	Tl
's Hertogenbosch Oost	Hto
Rosmalen	Rs
Tilburg	Tb
Oisterwijk	Ot

Tabel B.2: Stations op aantakkingen A2-corridor

In Figuur B.1 op de volgende pagina is een overzicht van de A2 corridor gegeven, met aan- en aftakkingen. Hierin is de ligging van de stations uit bovenstaande tabellen te zien.

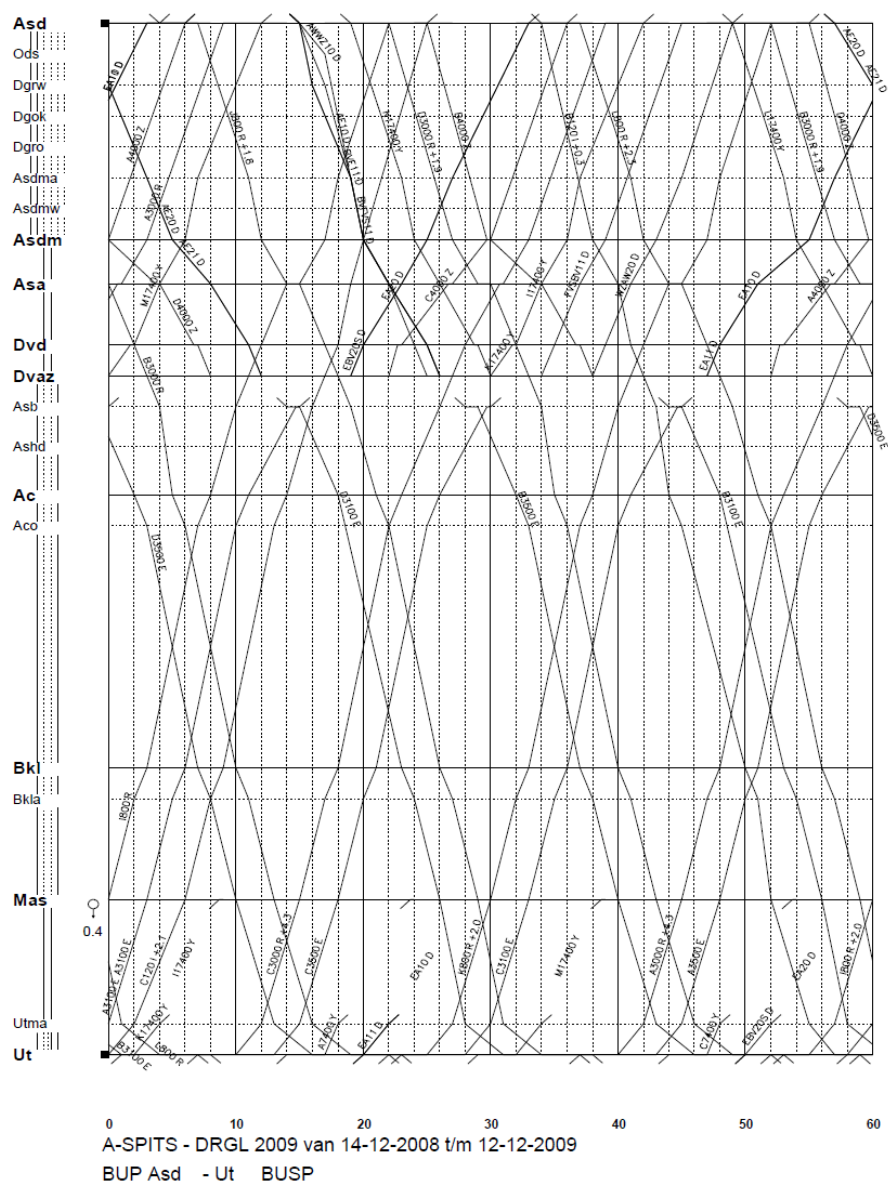


Figuur B.1: Schematische weergave A2-corridor

Vaker een trein,
da's pas fijn!?

BIJLAGE 2: “VOORBEELD BUP EN BSO”

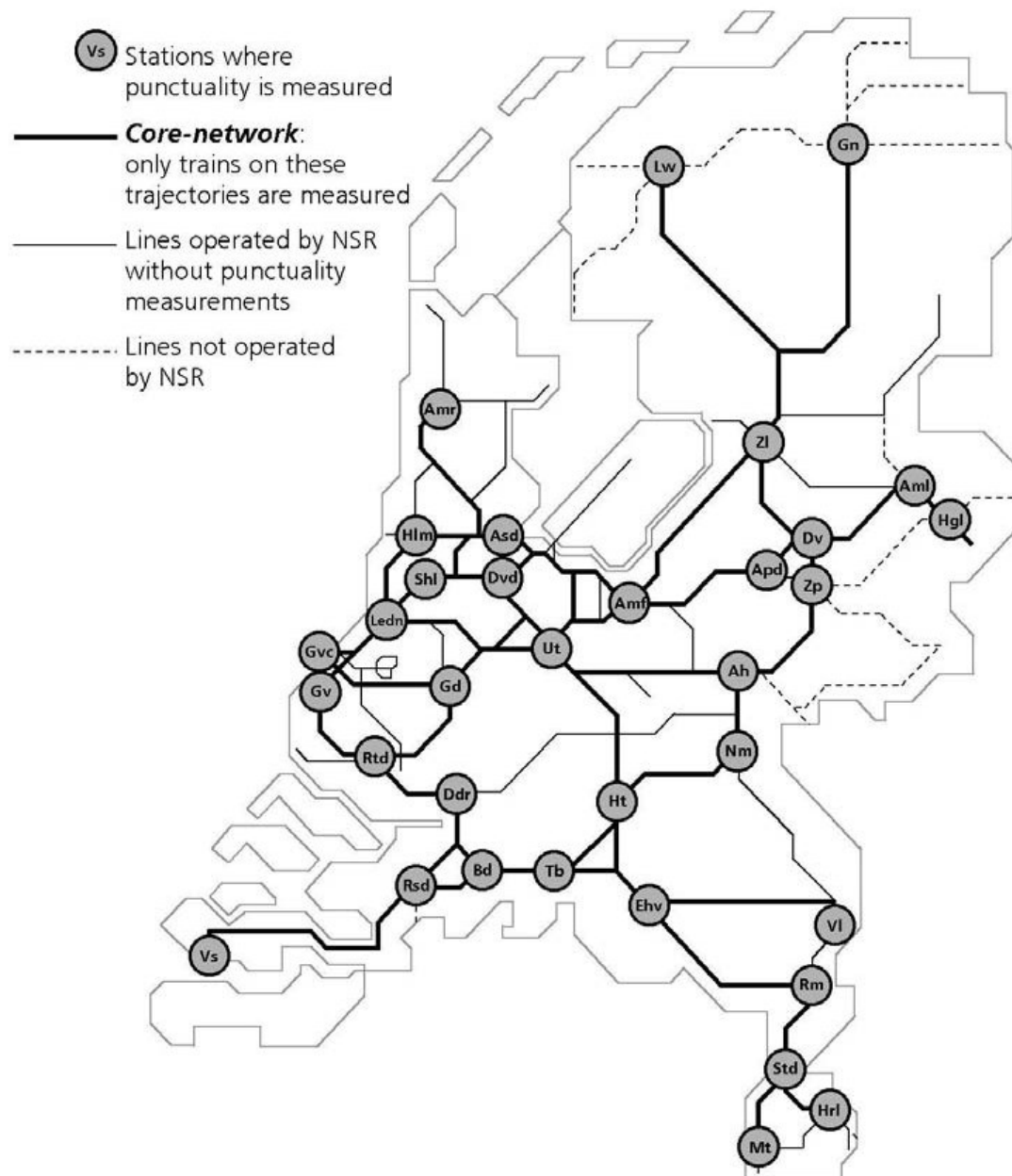
In Figuur B.3. is een voorbeeld van een BUP gegeven voor de avondspitsdienstregeling 2009 op het traject tussen Amsterdam Centraal (Asd) en Utrecht Centraal (Ut). De spooropstelling in de stations is vastgesteld in de Basis Spoor Opstelling (BSO), waarvan een voorbeeld is gegeven in Figuur B.3 voor het station Amsterdam Centraal.



Figuur B.2: BUP Amsterdam Centraal (Asd) - Utrecht Centraal (Ut), 2009 (Bron: ProRail)

BIJLAGE 3: “HOOFDSPOORNET”

In Figuur B.4 is het Nederlandse hoofdspoornet weergegeven.



Figuur B.4: Hoofdspoornet met meetstations formele punctualiteitscijfers (uit: Vromans, 2005)

BIJLAGE 4: “TREINSERIES”

In de tabel zijn alle treinseries die door de A2-corridor rijden weergegeven.

Serie	Type	Frequentie (aantal/uur) ³			Route
		Dal	Spits	Spits 6-6	Belangrijkste stations
120	ICE	6d			Asd - Ut - Ah - Koln - Frank
700	IC	1	1	1	Shl - Amf - Zl - Gn
800	IC	2	2	2	Alm - Asd - Ut - Ht - Ehv - Std - Mt ⁴
1600	IC	1	1	1	Shl - Amf - Apd - Dv - Aml - Hgl - Es
1900	IC	2	2	2	Gvc - Gv - Rtd - Ddr - Bd - Tb - Ehv - VI
3000	IC	2	2	2	Hdr - Amr - Asd - Ut - Ah - Nm
3100	IC	2	2	2	Shl - Ut - Ah - Nm
3500	IC	2	2	2	Shl - Ut - Ht - Ehv
3600	IC	2	2	2	Zl - Dv - Zp - Ah - Nm - Ht - Tb - Bd - Rsd
4000	Sp	2	2	2	Utg - Asd - Gd - Rtd
4300	Sp	2	2	2	Hfd - Dvd - Lls
4400	Sp	2	2	2	Nm - Ht ⁵
5200	Sp	2	2	2	Tbwt - Tb - Ehv
5700	Sp	2	2	2	Ledn - Shl - Dvd - Hvs - Ut
6000	Sp	2	2	2	Ut - Gdm - TI
7400	Sp	2	2	2	Bkl - Ut - Amf - Rhn
9600	Sp	2	2	2	Ht - Ehv - Dn ⁵
10800	IC	0	0	2	Hlm - Asd - Ut - Ht - Ehv
13600	Sp	2	2	2	Bd - Tb - Ht ⁶
14300	IC	0	2d	2d	Shl - Asdz - Alm - Lls
16000	Sp	2	2	2	Ut - Gdm - Ht ⁶
17400	Sp	2	2	2	Asd - Bkl - Ut - Vndc
26000	Sp	0	0	2	Ut - Gdm
32500	Sp	2	2	2	Gdm - Ddr

Tabel B.3: Treinserie in de A2-corridor

³ Indicatie d als het aantal treinen per dag gegeven is.

⁴ Indien 10800 rijdt: Ut - Ht - Ehv - Std - Mt

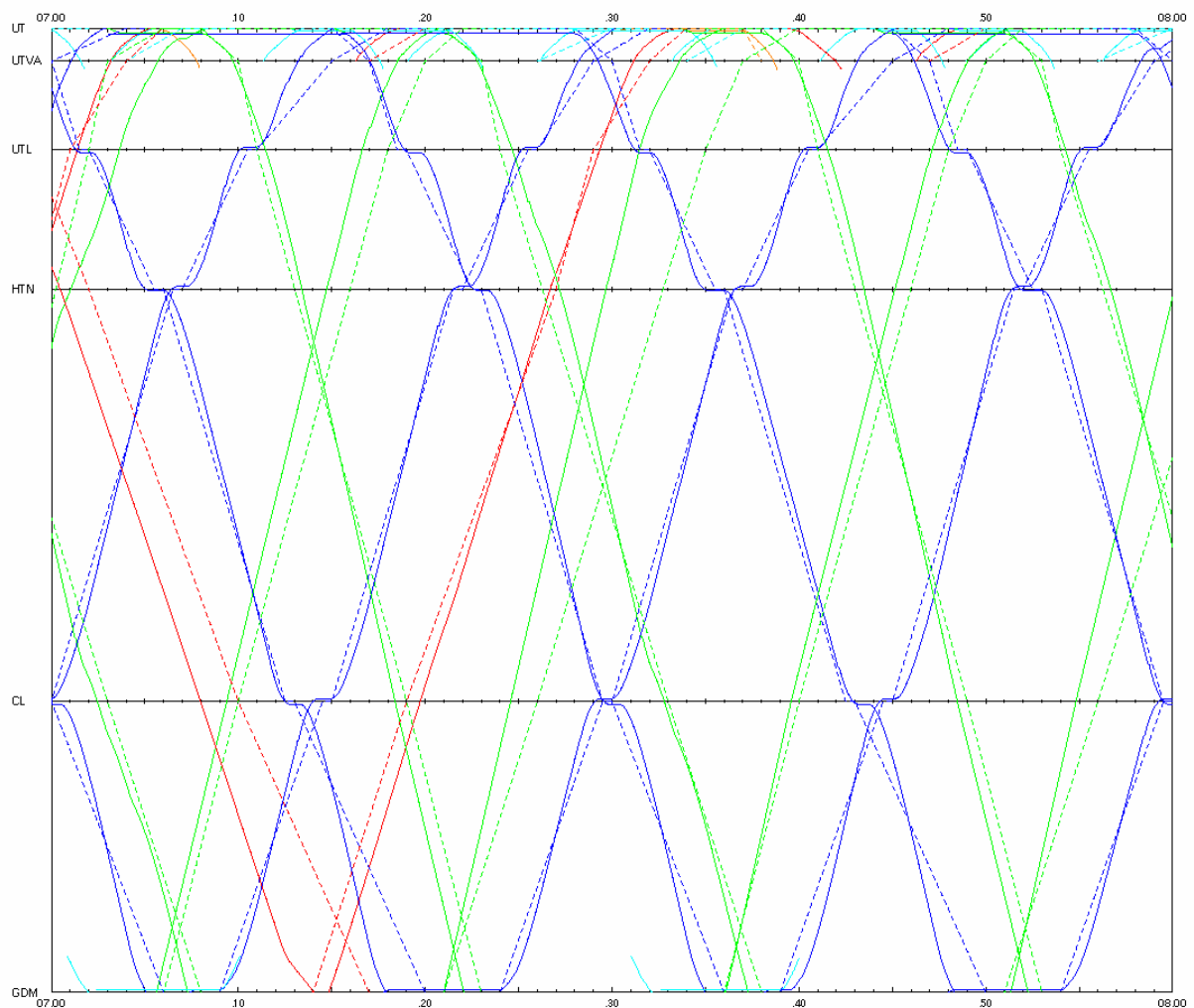
⁵ 4400 en 9600 worden samen als dienst gereden

⁶ 13600 en 16000 worden samen als dienst gereden

BIJLAGE 5: “TIJD-WEG DIAGRAM UIT OPENTRACK”

In Figuur B.5 is een voorbeeld van een tijd-weg diagram gegeven zoals dat gemaakt wordt door OpenTrack. Het betreft het traject tussen Utrecht Centraal Station en Geldermalsen, tussen 7:00 en 8:00 in de standaard-dienstregeling, zonder vertragingen. Op de x-as is de tijd weergegeven, op de y-as de dienstregelingspunten. In de grafiek geven de gestippelde lijnen de dienstregeling, de doorgetrokken lijnen geven de uitvoering in de simulatie. Groene lijnen zijn intercity's, blauwe lijnen zijn sprinters en rode lijnen zijn goederentreinen.

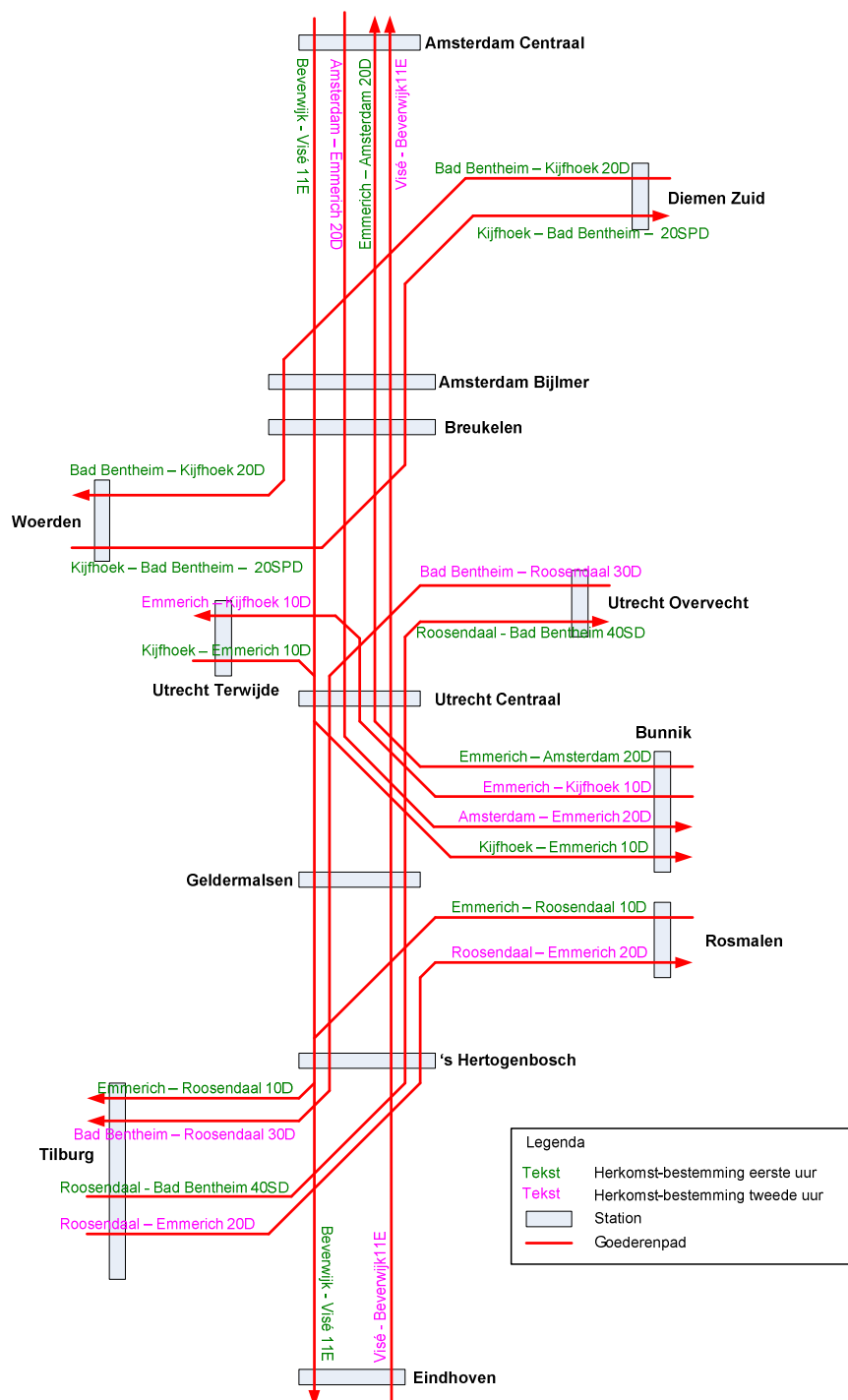
Utrecht CS - Geldermalsen



Figuur B.5: Voorbeeld tijd-weg diagram uit OpenTrack

BIJLAGE 6: “OVERZICHT GOEDERENPADEN”

Op de volgende pagina in Figuur B.6 is een overzicht van de goederenpaden in de A2-corridor opgenomen. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen een eerste en een tweede uur, omdat de richting van de treinen wisseld per uur. Een dag bestaat dus uit een opeenvolging van eerste uur – tweede uur – eerste uur – tweede uur etc. De namen van de treinlijnen zijn van de vorm [herkomst][bestemming][nummer][S/SD/D].[volgnummer], zoals ook beschreven in 2.2.2.2.



Figuur B.6 Goederenpaden A2-corridor

Vaker een trein,
da's pas fijn!?

BIJLAGE 7: “OPTIMALISATIE TREINENLOOP IN OPENTRACK”

Twee belangrijke verschillen tussen de treinenloop in werkelijkheid en die in OpenTrack zijn de manier van optrekken en snelheid houden en de manier waarop de treinenloop in een station geregeld wordt. Deze worden hieronder besproken. Vervolgens wordt besproken welke aanpassingen in OpenTrack zijn gedaan om de treinenloop te optimaliseren.

Optrekken en snelheid houden

In OpenTrack trekt een trein zo hard mogelijk op totdat hij zijn maximumsnelheid bereikt heeft. Deze houdt hij aan tot hij moet remmen voor een sein. Hierdoor kunnen treinen, zeker wanneer extra tijd is ingepland in de dienstregeling, te vroeg komen. In werkelijkheid weet een machinist vaak uit ervaring wat hem of haar te wachten staat, waardoor hij of zij al eerder het gas zal loslaten en de trein rustig zal laten uitrollen. Dit verschil is te beïnvloeden door de trein een prestatie-percentages te geven. De trein zal dan met dit percentage van zijn optrekken. Daarnaast zal hij zijn snelheid beperken tot dit percentage van de toegestane snelheid. Het prestatie-percentage kan per trein ingesteld worden en geldt dan voor de hele rit van de trein. Het is mogelijk om het prestatie-percentage afhankelijk te laten zijn van op tijd of vertraagd zijn van een trein.

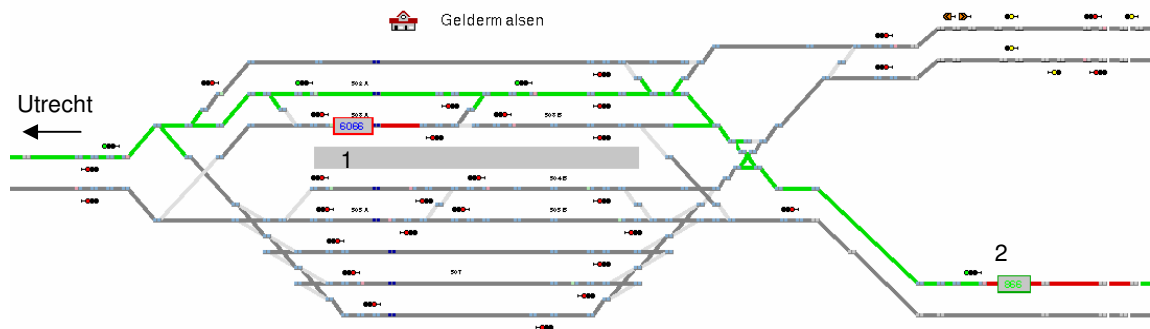
Toewijzen van rijwegen op stations

Het tweede belangrijke verschil zit in het toewijzen van rijwegen op een station. In OpenTrack worden alle rijwegen, zowel in de stations als op de vrije baan, toegewezen volgens het First Come First Served (FCFS) principe. Hierdoor wordt een rijweg altijd een aantal seinen naar voren ingesteld. Dit kan tot gevolg hebben dat een halterende trein niet kan vertrekken, omdat de rijweg van een andere trein, die nog buiten het station rijdt, al ingesteld is. In werkelijkheid wordt op de vrije baan ook altijd de rijweg een aantal seinen naar voren ingesteld. Op de stations wordt echter een ander systeem gebruikt. Dit systeem, Automatische Rijweg Instelling (ARI), heeft planregels op basis waarvan hij rijwegen toewijst aan treinen. Deze regels bepalen dus de volgorde waarmee treinen het station in kunnen rijden, welk spoor ze daar krijgen en op welke volgorde ze het station weer uitreiden. Naast ARI is er in stationsgebieden ook een treindienstleider. Deze persoon kan regels van ARI uitschakelen en in plaats daarvan handmatig rijwegen instellen.

Door bovenstaande verschillen kunnen treinen in de verkeerde volgorde gemodelleerd worden, ondanks dat in het model geen vertragingen zijn ingevoerd. Dit heeft tot gevolg dat de trein die naar een later tijdstip verplaatst wordt vertraging kan hebben en deze kan doorgeven op volgende treinen. Dit kan zowel gebeuren met treinen die hetzelfde baanvak op moeten, als treinen die uit hetzelfde station vertrekken maar ieder een ander baanvak op moeten rijden. Hieronder zullen twee voorbeelden worden gegeven om de beschreven problemen te illustreren.

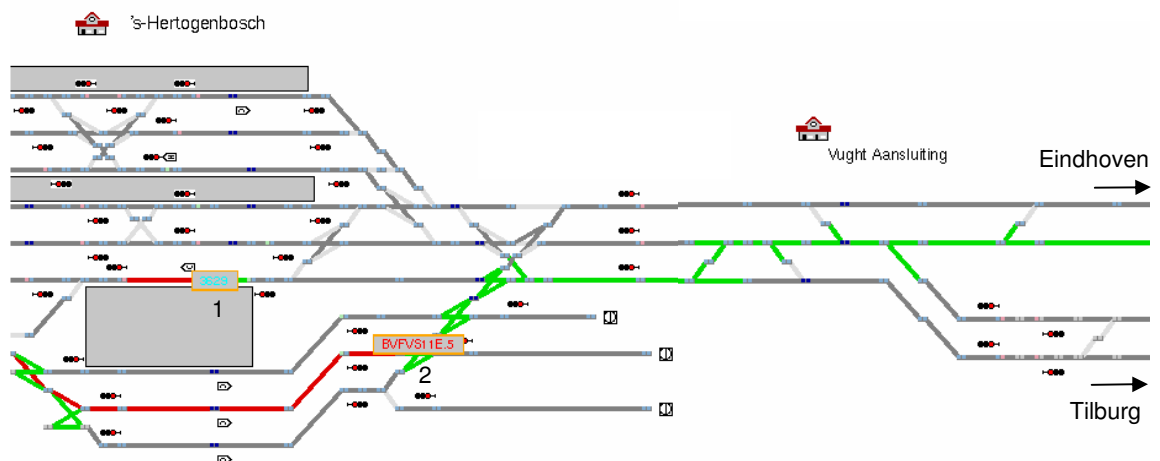
In Figuur B.7 is een voorbeeld van een volgordewissel gegeven. In dit figuur zijn de sporen weergegeven als grijze lijnen. Wanneer een lijn groen is, is het spoor gereserveerd voor een trein, ofwel er is een rijweg ingesteld. Op station Geldermalsen halteert trein 1 (het blokje met de rode rand). Volgens de dienstregeling zou hij eerder het spoor richting Utrecht op mogen dan trein 2 (het blokje met de groene rand). De vertrektijd van trein 1 is aangebroken, dus hij wil vertrekken. Zijn rijrichting is naar links. Het vertrek is echter niet mogelijk, omdat trein 2 (het blokje met de groene rand) al een rijweg gereserveerd heeft door het station heen. Trein 2

zal dus eerder dan trein 1 de vrije baan na Geldermalsen op gaan, in de verkeerde volgorde ten opzichte van de dienstregeling.



Figuur B.7: Voorbeeld volgordewissel in OpenTrack

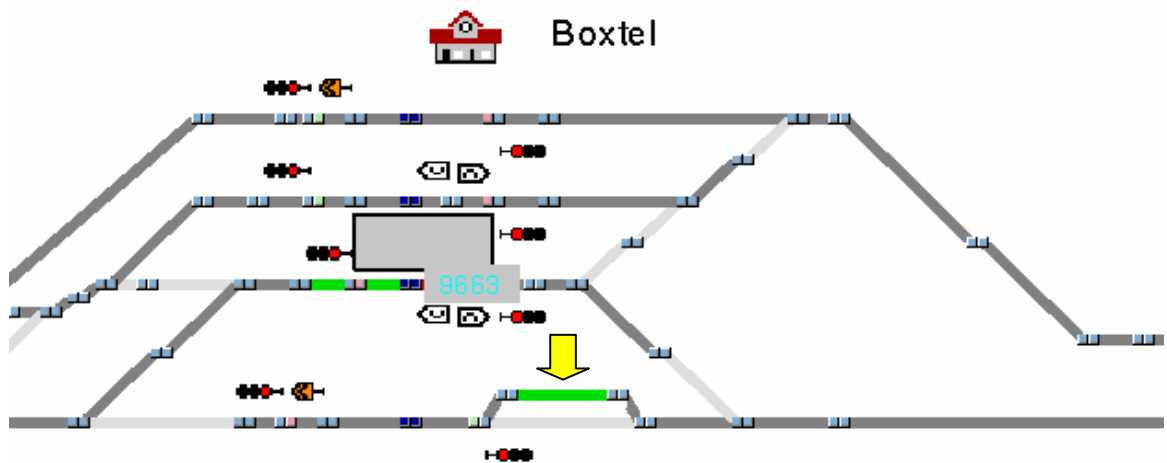
In Figuur B.8 is een voorbeeld gegeven waarbij een trein wordt verhinderd het station uit te rijden doordat een andere trein het emplacement bezet houdt. Wederom zijn vrije sporen grijs en sporen waarover een rijweg is ingesteld groen. Trein 1, het blokje met blauw erin, wil bij Vught Aansluiting richting Tilburg. Volgens de dienstregeling zou trein 1 eerder over het emplacement mogen dan trein 2 (blokje met rood erin). Deze is echter te vroeg en kan zijn rijweg over het emplacement eerder reserveren. Hierdoor kan trein 1 niet op de juiste tijd vertrekken.



Figuur B.8 Voorbeeld waarbij een trein wordt verhinderd het station uit te rijden in OpenTrack

Met deze oplossing is de uitrijvolgode niet optimaal te regelen, omdat treinen die halteren al aan de voorwaarde voldoen dat ze het station moeten zijn ingereeden. Dit kan opgelost worden door een "schijnstation" te maken. Dit is een station vlak achter het werkelijke station. Door de verbinding voor dit "schijnstation" te laten gelden, wordt er pas aan voldaan als de halterende trein aan het weggrijden is. Dergelijke schijnstations krijgen ook een stationspunt (zie 4.3.2.1), zodat ze als meetpunt worden opgenomen in de dienstregeling en de simulatieresultaten.

Wanneer een trein zijn rijweg al door het station heen reserveert, terwijl een andere trein volgens de dienstregeling eerder weg moet rijden, is een oplossing om een "schijnspoor" te maken, waar de aankomende trein overheen moet rijden. Dit "schijnspoor" wordt dan als bezet weergegeven op het moment dat een trein aan het halteren is op het spoor van de conflicterende trein. Hierdoor kan de aankomende trein zijn rijweg niet reserveren, het spoor is immers al bezet. In Figuur B.9 is hiervan een voorbeeld gegeven. Op het doorgaande spoor aan de onderkant van plaatje is een "schijnspoor" gemaakt, aangegeven met de gele pijl. Een trein (het blokje met blauw erin) staat aan het perron van station Boxtel. Hierdoor wordt ook het "schijnspoor" als bezet gezien, te herkennen aan de groene kleur van het spoor. Als de rijweg van een trein over het "schijnspoor" wordt geleid, zal hij dus niet door het station mogen totdat de halterende trein aan het perron vertrokken is.



Figuur B.9: Voorbeeld van een "schijnspoor" in OpenTrack

De aanpassingen zoals hierboven beschreven worden zo uitgevoerd, dat ze alleen invloed hebben op de treinen waarvoor ze gelden. Andere treinen zullen er geen veranderingen door ondervinden.

BIJLAGE 8: “BEPALING VERDELINGEN UIT REALISATIEDATA”

In deze bijlage wordt beschreven hoe de verdelingen voor de stochastische elementen in de simulaties bepaald zijn. Eerst wordt de verdeling van de ingangsvertragingen besproken, vervolgens van de prestatieverdeling.

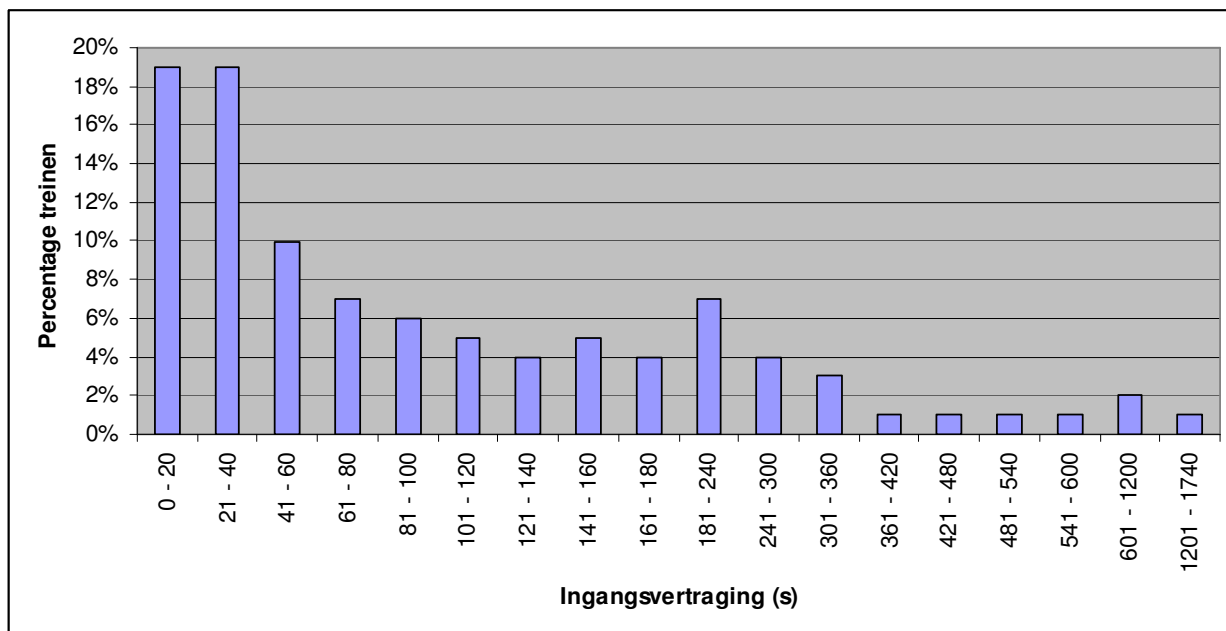
Ingangsvertragingen

Voor alle treinen is per treinserie en per richting (even en oneven) bepaald hoe groot de afwijking van de geplande vertrektijd was op het station waar zij het model binnen rijden. Hiervoor zijn de doordeweekse dagen in november 2009 gebruikt. Deze afwijkingen zijn ingedeeld in intervallen. De frequenties waarmee iedere afwijkinginterval voorkomt, bepalen een verdeling voor de ingangsvertraging. Deze intervallen zijn voor de eerste drie minuten verdeeld per twintig seconden, daarna per minuut en tenslotte in intervallen van tien en negen minuten. Binnen de intervallen is de verdeling lineair. Wanneer de afwijking van de geplande tijd groter is dan 29 minuten, is deze niet meegenomen in de verdeling, omdat de trein dan vervangen zal worden door een volgende trein van dezelfde serie. De gekozen intervallen zijn weergegeven in Tabel B.4. In Figuur B.10 is als voorbeeld de verdeling voor de ingangsvertraging van treinserie 800 in de even richting weergegeven. De 800 serie in even richting rijdt van Eindhoven naar Amsterdam, dus deze ingangsvertraging wordt toegepast op de trein als hij het model bij Eindhoven binnen rijdt.

Wanneer met een verbinding is aangegeven dat een trein het materieel van een andere dienst binnen het model overneemt (zie 5.1.1.1), is geen verdeling voor de ingangsvertraging aan deze trein gegeven. De trein kan dan namelijk al een vertraging krijgen van de trein die ervoor met hetzelfde materieel rijdt. Dit gebeurt als de aankomende trein zo laat is, dat de minimale stoptijd van drie minuten nog niet verstreken is als de vertrekkende trein moet vertrekken.

Interval	Afwijking ten opzichte van geplande tijd
0 – 20	0 tot 20 seconden na geplande tijd
21 – 40	21 tot 40 seconden na geplande tijd
41 – 60	41 tot 60 seconden na geplande tijd
⋮	⋮
161 – 180	161 tot 180 seconden na geplande tijd
181 – 240	181 tot 240 seconden (3 tot 4 minuten) na geplande tijd
241 – 300	241 tot 300 seconden (4 tot 5 minuten) na geplande tijd
⋮	⋮
541 – 600	541 tot 600 seconden (9 tot 10 minuten) na geplande tijd
601 – 1200	601 tot 1200 seconden (10 tot 20 minuten) na geplande tijd
1200 – 1740	1200 tot 1740 seconden (20 tot 29 minuten) na geplande tijd

Tabel B.4: Intervallen verdeling ingangsvertragingen



Figuur B.10: Verdeling ingangsvertraging voor serie 800 even bij Eindhoven

Prestatieverdeling

Volgens de dienstregeling heeft een trein van de 800 serie 16 minuten, ofwel 960 seconden beschikbaar voor het traject tussen Utrecht Centraal en Amsterdam Bijlmer. In OpenTrack is bepaald wat de snelst mogelijke rijtijd is op het traject; deze blijkt 860 seconden te zijn. Een trein heeft op dit traject dus de mogelijkheid om 100 seconden sneller te rijden dan volgens de dienstregeling nodig. Vervolgens is ook bepaald welk prestatiepercentage in OpenTrack overeen komt met rijtijden tussen 860 en 960 seconden, met intervallen van 20 seconden. In Tabel B.5 is het resultaat hiervan weergegeven in de eerste vier kolommen.

Rijtijd (s)		Prestatiepercentage		Percentage treinen
Van	Tot	Van	Tot	
860	880	100 %	98 %	8 %
880	900	98 %	95 %	23 %
900	920	95 %	93 %	30 %
920	940	93 %	90 %	24 %
940	960	90 %	88 %	15 %

Tabel B.5: Prestatieverdeling rijgedrag

Uit de realisatiedata is per tijdsinterval zoals gegeven in de eerste twee kolommen van Tabel B.5 bepaald hoeveel treinen van de 800 serie een rijtijd hebben in dit interval. Het aantal treinen met een rijtijd tussen 860 en 960 seconden is op 100 % gesteld. Hierbij zijn alleen de treinen meegenomen die minder dan 100 seconden te laat op respectievelijk Utrecht Centraal en Amsterdam Bijlmer vertrokken. Deze treinen kunnen namelijk nog op tijd aankomen op het volgende station, zodat aangenomen wordt dat de machinist zal rijden alsof hij of zij "op tijd" vertrokken is. Per interval is vervolgens bepaald welk percentage van de treinen een

rijtijd in het interval heeft. Dit levert de prestatieverdeling op zoals die is weergegeven in de laatste kolom van Tabel B.5.

De verdeling is ingevoerd in OpenTrack voor de gevallen dat een trein op tijd rijdt. Per trein die het model binnen komt, selecteert OpenTrack een prestatiepercentage, volgens de gegeven verdeling. Hierbij wordt binnen een interval de verdeling als lineair beschouwd. Wanneer een trein te laat is, is de prestatie van de treinen in OpenTrack op 100 % gesteld, omdat aangenomen wordt dat een machinist altijd zal proberen een achterstand op de dienstregeling in te halen.

Er is voor gekozen alleen de rijtijden uit de realisatiedata te gebruiken die tussen 860 en 960 seconden liggen, omdat deze de prestatie van de trein het meest zuiver weergeven. Wanneer de rijtijden langer zijn, kan dit door allerlei externe oorzaken komen, waar de machinist met zijn of haar rijgedrag geen invloed op kan uitoefenen. Zo kan een trein gehinderd worden door een andere trein, of kan een overwegstoring ervoor hebben gezorgd dat de treinen met een lagere snelheid moesten rijden.

In principe zouden ook de rijtijden van Sprinters gebruikt kunnen worden, omdat zij de langzaamste gebruikers van het spoor zijn en dus niet gehinderd zullen worden door goederentreinen of IC's waar ze achter blijven hangen. De realisatiedata is echter alleen beschikbaar voor de grotere stations, waardoor in de rijtijd van Sprinters ook stoptijden verwerkt zitten. Daarnaast zijn de rijtijden van een sprinter tussen twee stations in verhouding kort, waardoor de rijtijd in grote mate beïnvloed wordt door optrekken en afremmen bij het station.

BIJLAGE 9: “RESULTATEN PER SCENARIO”

In Tabel B.6 is per scenario de waarde voor de punctualiteit gegeven, wanneer gemeten wordt op alle stations. In Tabel B.7 zijn de punctualiteitswaarden gegeven berekend uit de realisatiedata, voor de doordeweekse dagen. In Tabel B.8 staan de waarden voor de netwerkstabiliteit per scenario gegeven.

Scenario	Standaard	6-6
1	92,16%	92,10%
2	91,57%	91,42%
3	92,71%	91,76%
4	92,01%	92,62%
5	91,62%	91,10%
6	90,80%	90,78%
7	91,14%	91,47%
8	91,62%	91,97%
9	91,57%	91,67%
10	91,86%	92,00%
11	92,12%	92,30%
12	91,84%	92,18%
13	91,36%	91,60%
14	92,51%	91,78%
15	92,82%	92,26%
16	91,59%	91,70%
17	91,76%	91,92%
18	90,77%	91,18%
19	93,57%	91,15%
20	90,75%	90,37%
21	91,29%	90,66%
22	91,99%	91,96%
23	91,84%	92,26%
24	92,54%	93,35%
25	89,72%	90,89%
26	92,91%	92,78%
27	92,51%	92,51%
28	91,52%	91,29%
29	92,04%	92,26%
30	90,92%	90,50%

Tabel B.6: Punctualiteitswaarden per scenario

Scenario	Standaard	6-6
31	90,89%	91,07%
32	92,44%	92,51%
33	91,89%	91,71%
34	91,62%	91,15%
35	92,27%	92,51%
36	92,92%	93,09%
37	92,87%	92,94%
38	92,57%	92,21%
39	92,62%	92,54%
40	91,61%	91,04%
41	91,79%	91,99%
42	92,74%	92,81%
43	92,34%	92,46%
44	90,75%	91,41%
45	90,34%	89,95%
46	89,05%	88,66%
47	91,47%	91,55%
48	90,62%	91,26%
49	92,96%	92,89%
50	92,16%	92,39%
51	92,74%	93,18%
52	92,57%	92,91%
53	91,72%	90,68%
54	91,31%	91,97%
55	90,90%	91,68%
56	91,57%	91,15%
57	91,34%	91,88%
58	92,42%	92,26%
59	92,07%	92,33%
60	92,67%	92,36%

Dag	Punctualiteit
2-nov	80,39%
3-nov	79,16%
4-nov	92,72%
5-nov	87,38%
6-nov	86,76%
9-nov	92,86%
10-nov	88,93%
11-nov	91,40%
12-nov	83,79%
13-nov	87,34%
16-nov	90,32%
17-nov	90,17%
18-nov	76,57%
19-nov	90,49%
20-nov	89,45%
23-nov	80,98%
24-nov	90,47%
25-nov	88,98%
26-nov	90,93%
27-nov	93,22%

Tabel B.7: Punctualiteitswaarden realisatiedata

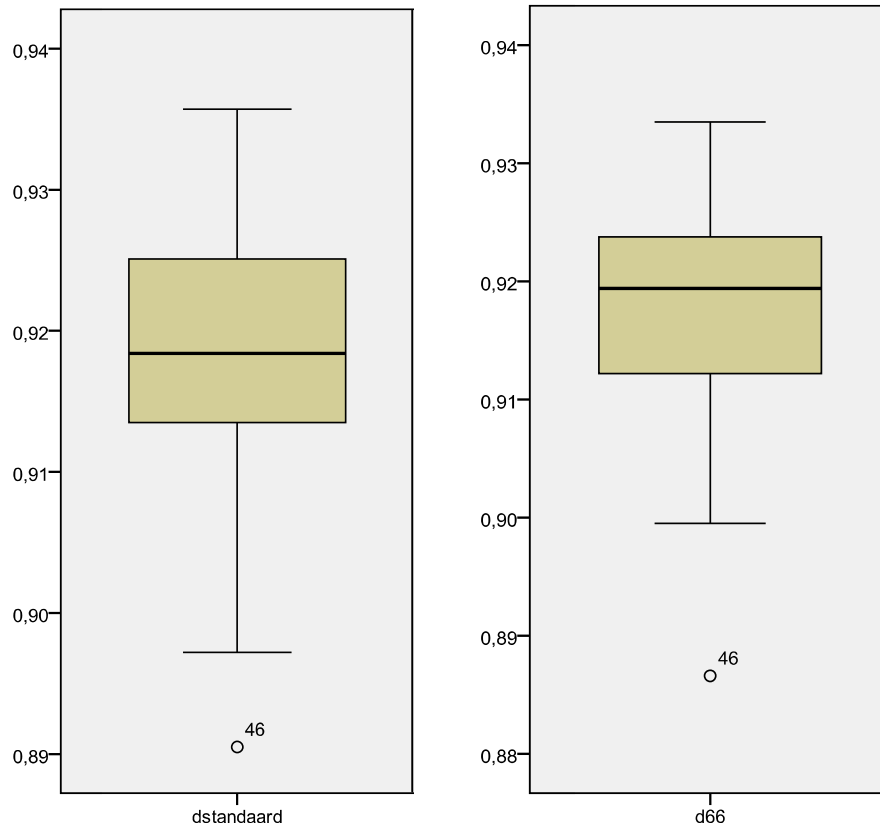
Scenario	Standaard	6-6
1	0,745	0,671
2	0,735	0,694
3	0,738	0,701
4	0,727	0,696
5	0,753	0,706
6	0,775	0,720
7	0,785	0,739
8	0,774	0,686
9	0,756	0,704
10	0,716	0,691
11	0,734	0,686
12	0,741	0,696
13	0,766	0,714
14	0,760	0,719
15	0,720	0,699
16	0,765	0,729
17	0,733	0,696
18	0,758	0,710
19	0,786	0,674
20	0,741	0,705
21	0,797	0,715
22	0,769	0,691
23	0,755	0,712
24	0,726	0,712
25	0,820	0,770
26	0,732	0,699
27	0,747	0,695
28	0,831	0,746
29	0,778	0,724
30	0,760	0,718

Tabel B.8: Netwerkstabiliteitswaarden per scenario

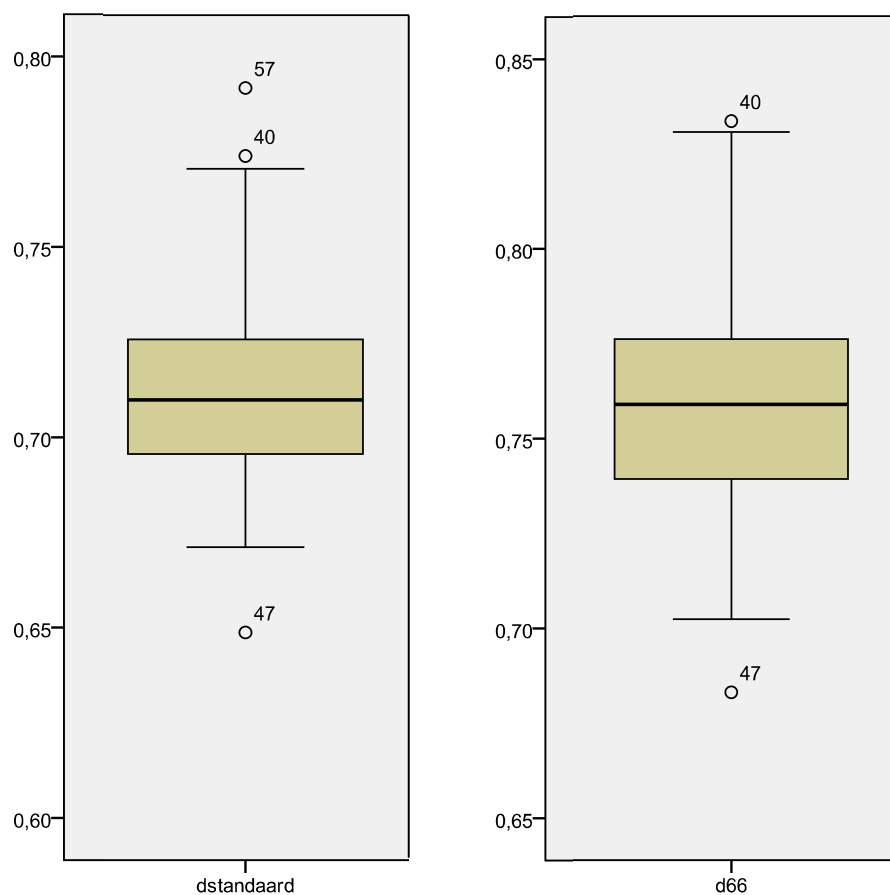
Scenario	Standaard	6-6
31	0,741	0,759
32	0,710	0,759
33	0,732	0,783
34	0,722	0,767
35	0,689	0,747
36	0,722	0,780
37	0,704	0,746
38	0,684	0,756
39	0,706	0,768
40	0,774	0,833
41	0,750	0,776
42	0,696	0,726
43	0,719	0,744
44	0,688	0,702
45	0,735	0,780
46	0,771	0,830
47	0,649	0,683
48	0,735	0,766
49	0,693	0,757
50	0,697	0,705
51	0,728	0,764
52	0,694	0,729
53	0,701	0,821
54	0,700	0,708
55	0,730	0,757
56	0,720	0,783
57	0,792	0,777
58	0,733	0,788
59	0,713	0,763
60	0,712	0,770

BIJLAGE 10: “BOXPLOTS RESULTAATWAARDEN”

In deze bijlage zijn boxplots van reeksen van resultaatwaarden weergegeven. De eerste twee boxplots (Figuur B.11) geven de boxplots voor de punctualiteit, wanneer deze gemeten wordt over alle stations, voor zowel de standaard dienstregeling als de 6-6 dienstregeling. De tweede twee boxplots (Figuur B.12) geven de boxplots voor de waarden van de netwerkstabiliteit.



Figuur B.11: Boxplots punctualiteit, links de standaarddienstregeling, rechts de 6-6 dienstregeling



Figuur B.12: Boxplots netwerkstabiliteit, links de standaarddienstregeling, rechts de 6-6 dienstregeling

BIJLAGE 11: “SIGNIFICANTIEWAARDEN STATISTISCHE TESTS PUNCTUALITEIT”

In deze bijlage worden de significantiewaarden voor de statistische tests van hoofdstuk 8 gegeven. Tabel B.9 geeft de significantiewaarden voor de Kolmogorov-Smirnov test waarmee normaliteit wordt onderzocht, Tabel B.10 geeft de significantiewaarden en resultaten voor de vergelijking per scenario.

	Kolmogorov-Smirnov			
	Standaarddienstregeling		6-6 dienstregeling	
	Normaal verdeeld?	Significantie ⁷	Normaal verdeeld?	Significantie ⁷
Gehele simulatie	Ja	0,200	Ja	0,200
Hoofdstations	Ja	0,200	Ja	0,191
Spits	Ja	0,200	Ja	0,057
Hoofdstations spits	Ja	0,200	Ja	0,098
800 en 3500 serie	Ja	0,200	Ja	0,200
800 en 3500 serie spits	Ja	0,200	Ja	0,200
Punctualiteit 3 min	Ja	0,200	Ja	0,200
Hoofdst. punct. 3 min	Nee	0,020	Nee	0,023

Tabel B.9: Significantiewaarden normaliteitstesten punctualiteit

	Vergelijking per scenario		
	Significant verschil?	Gebruikte test	Significantie
Gehele simulatie	Nee	t-test	0,937
Hoofdstations	Ja	t-test	0,000
Spits	Nee	t-test	0,540 ⁸
Hoofdstations spits	Ja	t-test	0,001
800 en 3500 serie	Ja	t-test	0,007
800 en 3500 serie spits	Nee	t-test	0,026 ⁹
Punctualiteit 3 min	Nee	t-test	0,879
Hoofdst. punct. 3 min	Ja	Wilcoxon's rangtekentest	0,000

Tabel B.10: Significantiewaarden paarsgewijze vergelijking punctualiteit

⁷ Waarden van 0,200 zijn een ondergrens voor de werkelijke significantie.

⁸ Omdat de significantiewaarde voor de normaliteit van de 6-6 dienstregeling dicht bij de grens van 0,05 zit, is naast de t-test ook een verdelingsvrije test uitgevoerd, de rangtekentest van Wilcoxon. Hieruit blijkt, met een Z-waarde van -0,880 en een significantiewaarde van 0,379 dat een verschil tussen de dienstregelingen niet kan worden aangetoond.

⁹ Dit is de eenzijdige waarde voor de significantie onder de hypothese dat de punctualiteit van de 6-6 dienstregeling lager is dan die van de standaarddienstregeling; de tweezijdige waarde voor de significantie is 0,51.