

Optimalisatie in de materieelplanning van reizigerstreinen



Research Paper Business Analytics
Ellis Leijte

Optimalisatie in de materieelplanning van reizigerstreinen



Research Paper Business Analytics
Ellis Leijte
Januari 2012

Onderzoeksbedrijf:
Nederlandse Spoorwegen
afd. Proceskwaliteit & Innovatie (NS Reizigers)
Laan van Puntenburg 100
3500 HA Utrecht

Vrije Universiteit Amsterdam
Faculteit Exacte Wetenschappen
De Boelelaan 1081
1081 HV Amsterdam



Voorwoord

Onderdeel van de master Business Analytics is het schrijven van een Research Paper Business Analytics. Hierbij worden de drie onderdelen van de studie toegepast in een zelfstandig onderzoek met praktijkwaarde. De drie onderdelen zijn bedrijfseconomie, wiskunde en informatica. De nadruk van het onderzoek ligt op het bedrijfsgerichte aspect van de studie.

Dit onderzoek gaat over een specifiek onderdeel uit de materieelplanning van de Nederlandse Spoorwegen (hierna: NS), namelijk het kiezen van een volgend doel voor het materieel van treinen bij hun eindstation. In de materieelplanning wordt het beschikbare materieel verdeeld over alle treinen uit de dienstregeling. Wanneer een trein bij zijn eindstation is gekomen, kan het materieel voor een nieuwe trein gebruikt worden. In dit onderzoek wordt beschreven hoe het materieelplanningsprogramma van de NS het beste keuzes hierin kan maken.

Het onderzoek is uitgevoerd bij het bedrijfsonderdeel NS Reizigers, dat de reizigerstreinen binnen Nederland verzorgt, op de afdeling Proceskwaliteit & Innovatie (hierna: PI). Deze afdeling implementeert beslissingsondersteunende systemen bij NS Reizigers voor diverse doeleinden, zoals personeelsplanning, dienstregeling en materieelplanning. Gedurende mijn master Business Analytics werk ik dual bij de afdeling PI.

Graag wil ik mijn begeleider prof. dr. Rob van der Mei van de Vrije Universiteit Amsterdam bedanken voor zijn ideeën. Daarnaast wil ik dr. Gábor Maróti en Dirk Jekkers van de Nederlandse Spoorwegen bedanken voor hun ondersteuning bij het maken van dit Research Paper.

Samenvatting

Dit onderzoek gaat over een specifiek aspect van de materieelplanning bij de Nederlandse Spoorwegen. De materieelplanning is de verdeling van het materieel over alle te rijden treinen. Hierbij wordt de lengte van de trein bepaald zodat er genoeg zitplaatsen geboden wordt aan het aantal verwachte reizigers maar er niet teveel lege zitplaatsen over blijven. Daarnaast moet er voldaan worden aan randvoorwaarden veroorzaakt door bijvoorbeeld perronlengtes. Bij de materieelplanning wordt gebruik gemaakt van het programma Tool voor Aanpassing van de Materieelinzet (TAM). Dit programma is gebaseerd op een wiskundig model dat besproken wordt in het proefschrift van Nielsen [1].

De materieelplanning maakt onder andere gebruik van keringen, ook wel materieelovergangen genoemd. Daarin wordt gespecificeerd met welke vertrekkende trein op dat station het materieel van een trein bij zijn eindstation gebruikt gaat worden. TAM is oorspronkelijk ontwikkeld als materieelplanningsprogramma voor de bijsturing. In de bijsturing is het van belang dat een nieuw materieelplan, gemaakt in geval van een verstoring, zo dicht mogelijk bij het oude plan blijft. Om deze reden maakt TAM gebruik van een referentieplan. De keringen voor een nieuw plan worden ofwel uit het referentieplan gehaald, ofwel moeten handmatig worden ingevoerd. Het handmatig invoeren van keringen kost erg veel tijd. Wanneer keringen niet worden opgegeven, stuurt TAM het materieel van eindigende treinen naar de voorraad van het station en haalt het materieel van startende treinen uit de voorraad. Dit is niet wenselijk.

Nielsen [1] heeft een methode beschreven waarmee flexibel keren met TAM mogelijk is. Flexibel keren houdt in dat TAM kan kiezen tussen de bestaande kering, indien aanwezig, of zelf een kering aanmaakt. Bij de laatste optie wordt gebruik gemaakt van een verzameling van composities. Eindigende treinen sturen een compositie naar deze verzameling en vertrekkende treinen halen hier een compositie uit. Wanneer op deze manier een koppeling is tussen een eindigende en een vertrekkende trein, is er een nieuwe kering gemaakt.

De voorkeur van de Nederlandse Spoorwegen is om te keren in keerpatronen in plaats van losse keringen. Dit heeft een aantal voordelen zoals voorspelbaarheid voor de klant en het vereenvoudigen van de planning bij stations. Het sturen op zo min mogelijk keerpatronen per station is mogelijk door aan de doelfunctie kosten toe te voegen per gebruikt keerpatroon. Omdat het model de doelfunctie minimaliseert, zal het sturen op zo min mogelijk gebruikte keerpatronen. Op deze manier zal keren zo veel mogelijk in keerpatronen gebeuren. Het sturen op keerpatronen is niet in het model opgenomen en om deze reden niet getest.

Flexibel keren is getest op vijf scenario's, ieder op drie verschillende manieren:

1. Er mag geen gebruik worden gemaakt van flexibel keren
2. Gebruik van flexibel keren kost niets
3. Gebruik van flexibel keren is mogelijk maar er zijn kosten aan verbonden.

De vijf scenario's zijn verschillend in complexiteit. Er geldt: hoe hoger de complexiteit, hoe langer de gemiddelde rekestijd van het programma. De gemiddelde rekestijd voor plannen waarbij flexibel keren mogelijk is, is veel langer dan wanneer flexibel keren niet mogelijk is. In Tabel 1 staat een vergelijking van de resultaten voor de materieelomlopen *met* en *zonder* flexibel keren. Flexibel keren resulteert in materieelomlopen met meer bakkilometers maar met minder wijzigingen ten opzichte van het referentieplan.

Tabel 1 Vergelijking resultaten plannen met en zonder flexibel keren

Scenario	Omlopen zonder flexibel keren	Omlopen met flexibel keren
1	Minder bakkilometers	Minder kilometers over de norm, minder wijzigingen t.o.v. het referentieplan
2	Minder bakkilometers, minder kilometers over de norm bij lage rangeerkosten en de standaardinstellingen	Minder kilometers over de norm bij hoge rangeerkosten, minder wijzigingen t.o.v. het referentieplan
3	Minder bakkilometers, minder kilometers over de norm	Minder wijzigingen t.o.v. het referentieplan
4	Minder bakkilometers, minder kilometers over de norm	Minder wijzigingen t.o.v. het referentieplan
5	Minder bakkilometers	Minder kilometers over de norm, minder wijzigingen t.o.v. het referentieplan

Vanwege de lange rekestijd is het aan te bevelen eerst onderzoek te doen naar flexibel keren op meer stations dan de kleine selectie die hier gemaakt is. Flexibele keringen of keerpatronen die hieruit volgen kunnen vervolgens als standaard worden ingesteld bij de planning, om daar de rekestijd te verkorten. Omdat de omlopen *met* flexibel keren minder wijzigingen ten opzichte van het referentieplan hebben dan de omlopen *zonder* flexibel keren, kan flexibel keren goed gebruikt worden in de planning wanneer er bijvoorbeeld vanwege werkzaamheden een nieuw materieelplan moet komen. Dan is het wenselijk om zo min mogelijk te wijzigen aan het referentieplan. Ten slotte heeft flexibel keren een positief effect op een nieuwe materieelomloop in de bijsturing. TAM wordt echter nog niet in de bijsturing gebruikt en dus kan flexibel keren ook nog niet toegepast worden.

Inhoud

Voorwoord	5
Samenvatting	7
1. Inleiding.....	11
2. Materieelplanning.....	13
2.1 Materieelsoort en samenstelling	13
2.2 Treinnummering.....	14
2.2.1 De NoordOost.....	15
2.3 Keringen	16
2.4 Materieelplan.....	17
3. Wiskundige modellen.....	19
3.1 Begrippen in het model.....	19
3.1.1 Compositieovergangen.....	19
3.1.2 Ritten en Taken.....	20
3.1.3 Bijsturing.....	21
3.2 Wiskundig model TAM	23
3.2.1 Doelfunctie	23
3.2.2. Variabelen.....	24
3.2.3 Het model	26
3.3 Wiskundig model flexibele keringen.....	28
3.3.1 Variabelen.....	28
3.3.2 Het model	30
4. Uitbreiden naar flexibele keerpatronen	33
4.1 Keerpatronen	33
4.2 Definitie	34
4.3 Keerpatronen in het model.....	34
5. Resultaten	37
5.1 Scenario's	37
5.2 Scenario 1: Treinserie 3000.....	40
5.3 Scenario 2: Treinseries 3000 en 3100	42
5.4 Scenario 3: Alle ICM-treinstellen.....	44
5.5 Scenario 4: De NoordOost.....	45
5.6 Scenario 5: De NoordOost met een verstoring	46
5.7 Vergelijking rekestijd met complexiteit.....	47
6. Conclusies en aanbevelingen	49
6.1 Flexibel keren in de planning	49
6.2 Gebruik bij studies.....	50
6.3 Bijsturing	50
7. Literatuurlijst.....	51
Bijlagen	53
Appendix A – Begrippenlijst	53
Appendix B – Materieelsoorten [2].....	55
Appendix C – Gebruikte afkortingen.....	56
Appendix D – Gebruikte notaties in het model.....	57
Appendix E – Instellingen van de doelfunctie van het model.....	58
Appendix F – Resultaten	60
Appendix G – Vergelijking van de rekestijd per scenario	67

1. Inleiding

Je tas dicht tegen je aan geklemd, de hete adem van een persoon vlak achter je in je nek en met je neus tegen het achterhoofd van een ander aan: reizen in een overvolle trein is niet bepaald comfortabel. Met de invoering van de nieuwe dienstregeling in december 2011 kwam dit zo vaak voor dat reizigersvereniging Rover een website lanceerde waarop reizigers die 'als haringen in een ton' vervoerd werden hun beklag konden doen. De NS verlengde kort daarop een aantal treinen. Na de problemen met de sneeuw begin februari 2012 werd er een aantal dagen een uitgedunde dienstregeling gereden. Ook hierbij was het nodig om treinen te verlengen omdat anders overvolle treinen het gevolg zijn.

Treinen rijden: het klinkt gemakkelijk maar er komt veel meer bij kijken dan de gemiddelde reiziger denkt. Voordat een trein het station binnenrijdt, is er een heel proces aan vooraf gegaan. Om te beginnen moet er een goede planning komen. De planning bestaat uit drie onderdelen, ook te zien in Figuur 1:

1. Dienstregeling. Hier wordt bepaald hoe de dienstregeling eruit gaat zien, oftewel hoe laat welke treinen gaan rijden.
2. Materieel. Gegeven een dienstregeling wordt bepaald hoe lang elke trein gaat worden. Hierbij wordt onder andere rekening gehouden met het verwachte aantal reizigers en het beschikbare materieel.
3. Personeel. Alle machinisten en conducteurs worden ingedeeld zodat elke trein een machinist en (vaak) twee conducteurs heeft.

Dit onderzoek heeft betrekking op de materieelplanning. In de materieelplanning worden alle beschikbare treinstellen verdeeld over alle treinen uit de dienstregeling. Voor elk beschikbaar treinstel wordt dus bepaald aan welke trein uit de dienstregeling deze toegewezen wordt. In de materieelplanning wordt er gebruik gemaakt van het programma Tool voor Aanpassing

van de Materieelinzet (hierna: TAM). Met als invoer de dienstregeling, beschikbaar materieel, randvoorwaarden en kostenparameters maakt het programma met behulp van een wiskundig model een materieelplanning. TAM wordt voornamelijk gebruikt om aanpassingen op een bestaande materieelplanning te maken maar het is ook mogelijk om een compleet nieuwe planning te



Figuur 1 Personeel, materieel en dienstregeling bij het perron

bouwen. Dit werkt echter nog niet naar wens. Wanneer een trein bij zijn eindstation is, kunnen de treinstellen gebruikt worden voor een trein die bij dat station vertrekt. TAM kan deze verbinding tussen een aankomende en vertrekkende trein niet zelf maken. Die verbinding is wel nodig voor een goede materieelplanning. Het handmatig invoeren van deze verbindingen is veel werk en kan zorgen voor een suboptimale planning omdat er extra beperkingen worden meegegeven aan het model.

Begin 2011 promoveerde Lars Nielsen op het onderwerp 'Bijsturing van materieel van reizigerstreinen' [1]. In dit proefschrift bespreekt hij het wiskundig model van TAM en de uitbreiding hiervan zodat TAM zelf de verbindingen kan maken tussen het materieel van een trein bij zijn eindstation en van een trein die bij dat station begint. Dit wordt een kering genoemd. Later in het rapport worden de begrippen nader toegelicht. In dit rapport wordt literatuuronderzoek verricht naar de wiskundige modellen achter TAM en de uitbreiding ervan aan de hand van het proefschrift van Nielsen. Daarnaast wordt deze methode geïmplementeerd en getest met een aantal scenario's. Ook wordt er onderzocht of het mogelijk is dat keringen zoveel mogelijk in hetzelfde patroon voorkomen. Kort gezegd houdt dit in dat op station B het materieel van de trein die elk halfuur uit station A komt altijd x minuten later naar station C gaat.

Het onderzoek wordt uitgevoerd aan de hand van de volgende probleemstelling:

Hoe kan TAM flexibele keringen maken en wat levert dit op?

De probleemstelling is opgesplitst in een aantal deelvragen. Deze deelvragen vormen de leidraad voor het onderzoek:

1. Wat is de wiskundige methode achter TAM?
2. Welke wiskundige methode gebruikt Nielsen om TAM keringen te laten maken?
3. Wat is de invloed van flexibel keren op het materieelplan?
4. Hoe kan deze methode worden uitgebreid van keringen naar keerpatronen?

Wanneer het materieelplanningsprogramma zelf keringen of keerpatronen kan maken, is het mogelijk om een compleet nieuwe materieelplanning te maken zonder handmatig alle keringen of keerpatronen vast te leggen. Hierdoor vallen onnodige beperkingen weg, waardoor de kwaliteit van de materieelplanning beter kan worden. Daarnaast scheelt het veel handmatig invoerwerk.

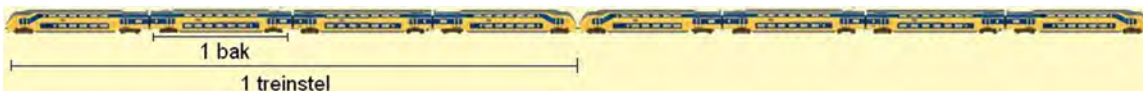
Dit verslag is als volgt opgebouwd. In hoofdstuk 2 wordt dieper ingegaan op de materieelplanning. Hierbij komen een aantal onderdelen aan bod die ook in het model terugkomen. Wanneer de lezer al bekend is met materieelplanning bij de Nederlandse Spoorwegen, is het niet nodig dit hoofdstuk te lezen. Het wiskundig model achter TAM en het model achter het concept van flexibele keringen worden besproken in hoofdstuk 3. In hoofdstuk 4 wordt besproken hoe een uitbreiding van keringen naar keerpatronen in het model verwerkt kan worden. De prestatie van flexibele keringen vergeleken met het huidige wiskundige model staat in hoofdstuk 5. In hoofdstuk 6 worden uit deze resultaten conclusies getrokken over het gebruiken van flexibele keringen.

2. Materieelplanning

In de inleiding is al genoemd dat het planningsonderdeel bij de NS uit drie onderdelen bestaat: planning van de dienstregeling, het materieel en het personeel, waarbij alleen materieelplanning van belang is in dit onderzoek. In dit hoofdstuk wordt dieper ingegaan op het proces van de materieelplanning. Kennis hiervan is nodig om het wiskundig model achter TAM en de te onderzoeken uitbreiding van TAM te begrijpen.

2.1 Materieelsoort en samenstelling

De *materieelplanning* is de verdeling van het materieel over alle te rijden treinen. In de materieelplanning wordt dus bepaald hoe lang elke trein is. Een trein bestaat uit een of meerdere *treinstellen*, die aan elkaar gekoppeld kunnen worden. Elk treinstel is van een bepaalde *materieelsoort*. Zo is er bijvoorbeeld de dubbeldekse Intercity, 'VIRM' genoemd, en het nieuwste sprintermaterieel, 'SLT' genoemd. Daarnaast zijn er per materieelsoort treinstellen van twee verschillende lengtes. Zo kan een VIRM-treinstel uit vier of zes bakken bestaan, waarbij een bak één treinrijtuig is. Op de website van Pijpers [2] zijn plaatjes van alle soorten treinstellen te vinden, waaronder het plaatje in Figuur 2. In dit figuur zijn twee gekoppelde VIRM treinstellen met elk vier bakken te zien. In totaal heeft deze trein dus een lengte van acht bakken. Een overzicht van de meest voorkomende materieelsoorten is te vinden in Appendix B.



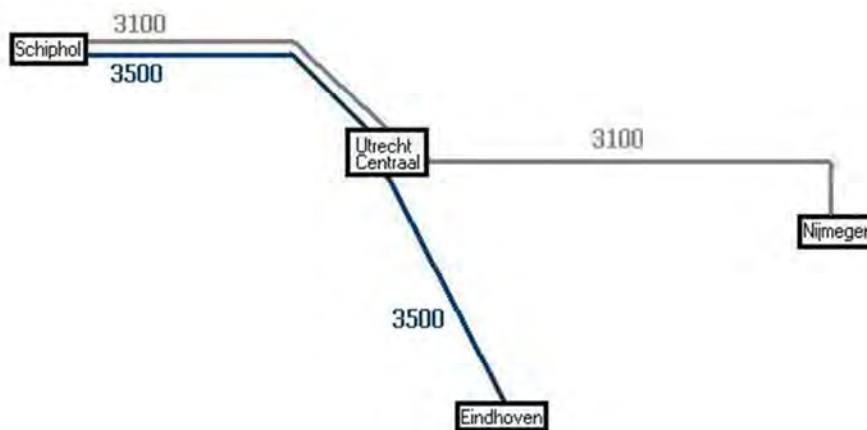
Figuur 2 Twee gekoppelde VIRM-4 treinstellen [2]

Er kunnen geen treinstellen van een verschillende materieelsoort aan elkaar gekoppeld worden. Het is wel mogelijk om treinstellen met verschillende lengtes te koppelen, mits deze van dezelfde materieelsoort zijn. Een bepaalde koppeling van treinstellen heet de *samenstelling*, of de *compositie*, van een trein. In het algemeen geldt dat een samenstelling niet mag bestaan uit meer dan vijftien bakken, bij een aantal stations zijn de perrons korter waardoor hier een kleinere maximale lengte geldt.

In de materieelplanning wordt de lengte van de trein zoveel mogelijk afgestemd op het aantal reizigers tussen de stations. Hierbij moet er plaats zijn voor alle reizigers, maar leidt het inzetten van te lange, en dus grotendeels lege, treinen tot onnodige kosten. Daarnaast zijn er nog een aantal beperkingen, zoals de eerder genoemde maximale treinlengte. Ook is het overdag op veel plekken niet mogelijk om stellen aan de trein toe te voegen of eraf te halen, en dus is het niet mogelijk om de lengte van de trein aan te passen. Het toevoegen van treinstellen heet *bijplaatsen*, het weghalen van treinstellen wordt *aftrappen* genoemd.

2.2 Treinnummering

De treinen worden aangeduid met *treinnummers*. Bijvoorbeeld, de trein met treinnummer 3147 vertrekt om 13:08u uit Amsterdam Zuid en is om 13:32u in Utrecht Centraal. Hierbij geven de laatste twee cijfers aan op welk moment van de dag de trein ongeveer rijdt, dit wordt verderop toegelicht. Alle cijfers daarvoor geven de *treinserie* weer, deze is te vergelijken met buslijnen, tramlijnen, etc. Het geeft aan welke route de trein volgt. Of het een even of oneven nummer is, bepaalt de richting van de trein. Over het algemeen geldt dat even nummers naar Amsterdam toegaan. De 3147 behoort tot de 3100-serie, welke van Nijmegen naar Schiphol en vice versa rijdt. Vanaf Amsterdam Zuid gaat er elk kwartier een trein naar Utrecht Centraal, echter heeft deze om het halfuur eindbestemming Eindhoven en om het halfuur eindbestemming Nijmegen. De verschillende eindbestemmingen geven aan dat het om twee verschillende treinseries gaat. Treinserie 3500 rijdt tussen Eindhoven en Schiphol.

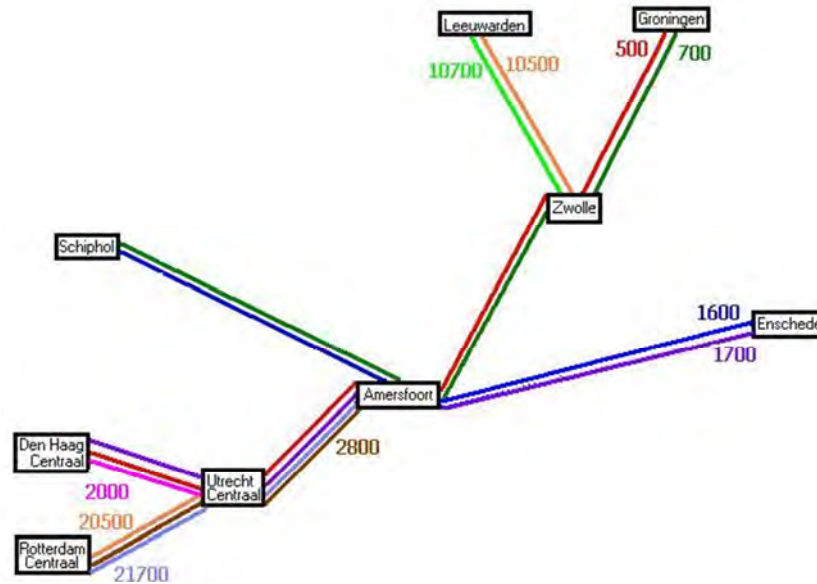


Figuur 3 Routes van treinseries 3100 en 3500

Voor alle treinseries geldt dat zij niet vaker dan eenmaal per halfuur rijden. Als er tussen twee stations om het kwartier een trein rijdt, zijn dit dus altijd twee verschillende treinseries. De treinseries 3100 en 3500 zijn te zien in Figuur 3. Het treinnummer gaat per halfuur twee omhoog. De trein die om 13:38 uur vanaf Amsterdam Zuid richting Utrecht Centraal vertrekt, heeft dus treinnummer 3149. Ook wanneer een treinserie maar eenmaal per uur rijdt, gaat de nummering per halfuur twee omhoog. Een trein later heeft in dat geval dus een treinnummer dat vier hoger is. Op deze manier is af te leiden op welk moment van de dag een trein ongeveer rijdt. Treinen in de ochtendspits zullen doorgaans op een nummer tussen vijftien en de 30 eindigen. Een ander voordeel van treinnummering is dat een wijziging in de dienstregeling van enkele minuten geen invloed heeft op het treinnummer.

2.2.1 De NoordOost

De treinseries uit de *NoordOost* vormen een verbinding tussen de Randstad (Schiphol, Den Haag Centraal, Rotterdam Centraal) met het Noorden (Groningen en Leeuwarden) en het Oosten (Enschede). In Figuur 4 staan de treinseries die tot de NoordOost behoren.



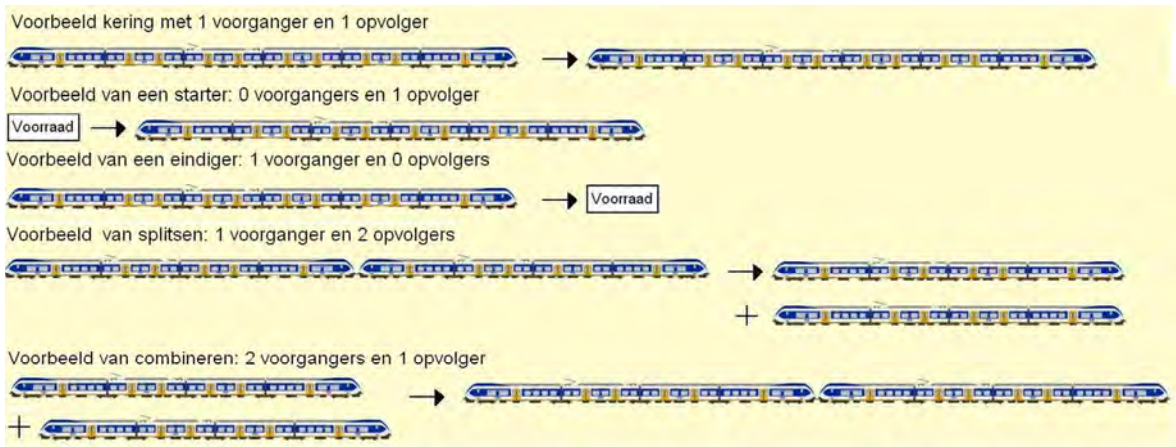
Figuur 4 Treinseries uit de NoordOost

Deze treinseries zijn zo in elkaar gelegd, dat er elk uur directe verbindingen zijn tussen deze steden. Zo gaat er vanaf Den Haag Centraal ieder uur een intercity naar Enschede, twee keer per uur een intercity naar Utrecht Centraal en een keer per uur een intercity naar Leeuwarden/Groningen. Deze trein splitst in Zwolle, zodat er een deel naar Leeuwarden en een deel naar Groningen gaat. Ook vanuit Schiphol splitst de trein naar Groningen/Leeuwarden in Zwolle. In Figuur 4 is te zien dat de treinen die richting Leeuwarden gaan een andere treinserie krijgen. Zo is treinserie 10700 afgesplitst van de 700 en treinserie 10500 van de 500. Splitsen gebeurt ook in de richting Den Haag Centraal/Rotterdam Centraal. Treinen naar Rotterdam Centraal krijgen treinseries 20500 en 21700. Dit zijn afsplitsingen van de 500 respectievelijk de 1700. Het kruispunt van al deze series ligt in Amersfoort, hier is het mogelijk over te stappen. Op deze manier is er eenmaal per uur een directe verbinding tussen de steden en eenmaal per uur een verbinding met één keer overstappen.

2.3 Keringen

In de materieelplanning wordt onder andere gebruik gemaakt van *keringen*. Een kering geeft aan dat het materieel van een trein bij zijn eindstation gebruikt wordt voor een trein die bij dat station begint en om welke treinnummers dit gaat. Een voorbeeld hiervan is dat in Nijmegen de 3147 keert op de 3152. Dit houdt in dat het materieel van de trein die om 14:33 uur in Nijmegen eindigt, bij de trein gaat horen die om 14:57 uur in Nijmegen start. In dit geval 'keert' het materieel dus letterlijk, het gaat terug naar waar het vandaan kwam. Het is niet noodzakelijk dat het materieel op de treinserie keert waarmee het geëindigd is. Een kering heet ook wel een *materieelovergang*.

In een kering heet het treinnummer waarvan het materieel vrijkomt de *voorganger*, het treinnummer waarvoor het materieel gebruikt gaat worden heet de *opvolger*. Het is ook mogelijk dat een materieelovergang uit twee voorgangers en één opvolger bestaat, dit wordt *combineren* genoemd. Wanneer een materieelovergang uit één voorganger en twee opvolgers bestaat, heet dit *splitsen*. Deze naam is voor de hand liggend, het materieel splitst zich letterlijk naar meerdere series. Een kering die bestaat uit twee voorgangers en twee opvolgers is niet toegestaan.



Figuur 5 Voorbeelden van keringen

Ten slotte zijn er nog twee mogelijkheden. Als er bij een kering geen voorganger is maar wel een opvolger, heet deze een *starter*. Wanneer een kering wel een voorganger heeft maar geen opvolger, heet het een *eindiger*. Bij een starter komen de benodigde stellingen uit de voorraad van het station, bij een eindiger gaan de gebruikte stellingen naar de voorraad van het station toe. In Figuur 5 staan alle mogelijke keringen in een overzicht. Andere combinaties van aantal voorgangers en aantal opvolgers zijn niet mogelijk.

2.4 Materieelplan

Het resultaat van de materieelplanning is een *materieelplan*: hierin staat per dag voor elk treinstel wat deze op elk moment van de dag doet. Zo wordt dus opgegeven met welk treinnummer het treinstel vanaf welk station start, welke materieelovergangen en treinnummers volgen en met welk treinnummer het treinstel bij welk station eindigt. Daarnaast wordt ook de positie steeds weergegeven. Al deze gegevens samen heten de *dienst* van een treinstel. Een voorbeeld van een dienst is te zien in Figuur 6. Deze dienst loopt van 6:00 uur 's ochtends tot 12:00 uur 's middags. Op deze manier wordt de dienst ook in TAM weergegeven.

In Figuur 6 is OA24 het nummer van een specifiek treinstel, ook wel het *dienstnummer* van dit treinstel genoemd. Boven elk blokje staat de afkorting van het beginstation en onder elk blokje de afkorting van het eindstation van dat traject. De breedte van het blokje geeft de tijdsduur aan. Hoe breder het blokje, hoe langer de trein over dat stuk doet. Wanneer een blokje niet breed genoeg is om zowel treinnummer als positie weer te geven, wordt alleen de positie getoond. Dit is het geval bij het stuk van Schiphol (Shl) naar Hoofddorp opstel terrein (Hfdo).



Figuur 6 Voorbeeld van een dienst

Bij de positie geldt dat vooraan positie 0 is en dat daarna de posities oplopen. Dit treinstel begint in Nijmegen. Wegens gebrek aan ruimte wordt de positie niet getoond. Hij rijdt naar Arnhem, om daar op positie 0 van treinnummer 3118 naar Utrecht (Ut) verder te gaan, dus het treinstel rijdt nu vooraan. Omdat de 3100 in Arnhem aan dezelfde kant van het station binnenkomt als dat hij weggaat, rijdt het treinstel wat eerst voorop zat nu achteraan en vice versa. Mocht de trein uit meer dan twee treinstellen bestaan, geldt dat het treinstel op positie 1 naar Arnhem, vanaf Arnhem op de één na laatste plaats rijdt, etc. Vanuit Utrecht gaat de OA24 verder met de 3118 naar Schiphol (Shl) en vervolgens naar Hoofddorp opstel terrein (Hfdo). Een tijd later rijdt het treinstel vooraan tussen Hoofddorp opstel terrein en Schiphol en erna vooraan op de 3535 van Schiphol naar Eindhoven (Ehv).

Bij het maken van een materieelplan is het vaak wenselijk dat er weinig wordt gewijzigd aan het referentieplan. Er zijn bijvoorbeeld vrijwel elk weekend werkzaamheden waardoor op diverse trajecten geen treinen kunnen rijden. De materieelomloop moet daardoor steeds aangepast of opnieuw gemaakt worden. Voor zowel de lokale planningsafdelingen als de reiziger is het prettig als er niet teveel gewijzigd wordt aan het bestaande plan. Het model is hierop te sturen.

3. Wiskundige modellen

In dit hoofdstuk wordt dieper ingegaan op het wiskundig model achter TAM en het wiskundig model achter flexibele keerpatronen. Beide modellen zijn volledig besproken in Nielsen [1]. Om te beginnen zullen een aantal begrippen toegelicht worden. Vervolgens wordt het wiskundig model van TAM besproken en ten slotte het model achter flexibele keerpatronen.

3.1 Begrippen in het model

3.1.1 Compositieovergangen

In hoofdstuk 2 zijn de begrippen compositie en materieelovergang besproken. Nu horen er bij elke materieelovergang nul, één of twee voorgaande composities en nul, één of twee opvolgende composities. Deze voorgaande en opvolgende composities gecombineerd wordt een *compositieovergang* genoemd: het geeft aan hoe de compositie bij een materieelovergang verandert. In het model heeft elke kering een aantal toegestane compositieovergangen. Hierin staan dus de toegestane voorgaande composities en de daarbij horende toegestane opvolgende composities. Dit heeft voornamelijk te maken met de *rangeerregels* op een bepaald station. Zo is het vaak in de spits niet toegestaan om stellen bij te plaatsen; een gevolg hiervan zijn compositieovergangen waarbij de opvolgende composities niet groter zijn dan de voorgaande composities. Een voorbeeld van toegestane compositieveranderingen voor een bepaalde kering op een station is te zien in Tabel 2. VIRM 4 geeft aan dat het om een treinstel gaat van het materieelsoort VIRM met vier bakken. Bij deze kering is er één voorganger en één opvolger.

Tabel 2 Voorbeeld van toegestane compositieovergangen

Voorganger 1	+	Voorganger 2	→	Opvolger 1	+	Opvolger 2
1x VIRM 4	-			1x VIRM 4	-	
1x VIRM 6	-			1x VIRM 6	-	
2x VIRM 4	-			1x VIRM 4	-	
2x VIRM 4	-			2x VIRM 4	-	
1x VIRM 4 + 1x VIRM 6	-			1x VIRM 4	-	
1x VIRM 4 + 1x VIRM 6	-			1x VIRM 6	-	
1x VIRM 4 + 1x VIRM 6	-			1x VIRM 4 + 1x VIRM 6	-	

Hier is te zien dat de opvolgende treinen ofwel dezelfde compositie mogen hebben ofwel een compositie met een treinstel minder. Een treinstel aftrappen is alleen mogelijk wanneer de voorganger twee treinstellen VIRM-4 heeft of een treinstel VIRM-4 en een treinstel VIRM-6. Blijkbaar mogen deze treinen alleen met het materieel VIRM gereden worden en zijn er geen toegestane composities die een lengte hebben van meer dan tien bakken.

3.1.2 Ritten en Taken

Elke reis van een trein van begin- tot eindstation is onder te verdelen in *ritten*. Een rit is een stuk tussen twee stations waarbij de samenstelling van de trein niet kan veranderen. Voor de materieelplanning is het niet interessant om alle stations te zien waar de trein stopt, daarom worden alleen de stations getoond waar de samenstelling van de trein kan veranderen. Tussen het begin- en eindstation van een rit kunnen dus nog stations liggen waar de trein stopt. In Figuur 9, waar een voorbeelddienst van treinstel OA24 getoond is, is dit goed te zien. Dit is hetzelfde plaatje als Figuur 6 in hoofdstuk 2.4 Materieelplan. Het derde blokje van links laat zien dat het treinstel van Utrecht Centraal (Ut) naar Schiphol (Shl) rijdt. Tussen Utrecht Centraal en Schiphol stopt de trein op Amsterdam Bijlmer ArenA en Amsterdam Zuid, deze stations zijn in de dienst echter niet terug te zien. Dit komt omdat bij deze stations de samenstelling van een trein niet kan veranderen.



Figuur 9 Voorbeeld van een dienst met taken

Een dienst bestaat dus uit meerdere ritten, met voor elke rit een bijbehorende positie. Die combinatie van rit en positie heet een *taak*. Elk blokje in Figuur 9 is gelijk aan een taak. Wanneer er naar een trein, treinnummer of treinserie gekeken wordt, is er sprake van ritten. Wanneer er naar specifieke treinstellen gekeken wordt, is er sprake van taken.

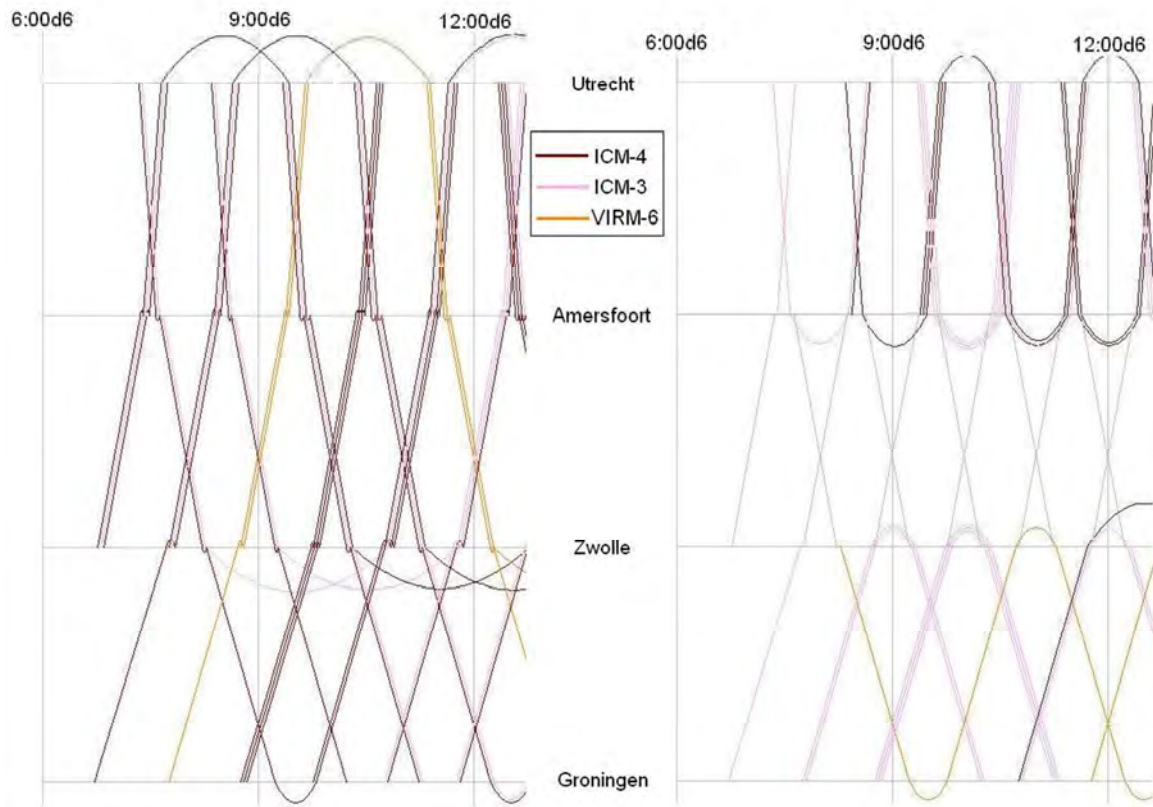
3.1.3 Bijsturing

Begin 2011 promoveerde Lars Nielsen op het onderwerp 'Rolling Stock Rescheduling in Passenger Railways': het *bijsturen* van materieel in passagierstreinen. Bijsturen houdt in dat de (materieel)planning wordt aangepast in het geval van een verstoorde situatie. Dit gebeurt voornamelijk op de dag zelf. Wanneer er bijvoorbeeld door werkzaamheden langer van tevoren bekend is dat er op een traject geen treinen kunnen rijden, wordt dit al op de planningsafdeling aangepast. Als er bijvoorbeeld geen treinverkeer meer mogelijk is op een bepaald traject door een defecte bovenleiding, moet het plan in de bijsturing zo snel mogelijk worden aangepast. De treinen aan beide kanten van de verstoring zullen moeten keren in plaats van doorrijden. Hierdoor krijgt het materieel dus een nieuwe kering. Als voorbeeld wordt een verstoorde situatie tussen Amersfoort en Zwolle besproken. Treinserie 500 rijdt tussen Den Haag Centraal en Groningen en heeft dus last van deze verstoring. In Figuur 10 is te zien op welk stuk.



Figuur 10 Route van treinserie 500 met verstoring tussen Amersfoort en Zwolle

In Figuur 11 staan tijd-weg diagrammen van treinserie 500 in een normale situatie (links) en een verstoorde situatie (rechts) tussen Utrecht Centraal en Groningen. In het linker diagram lopen de gekleurde lijnen van de verschillende treinstellen over de gehele lengte door om dan pas te keren. In het rechterdiagram keren de lijnen vanuit Utrecht al in Amersfoort en de lijnen vanuit Groningen al in Zwolle. Er zijn dus nieuwe keringen gemaakt.



Figuur 11 Tijd-weg diagrammen *met en zonder verstoring* tussen Amersfoort en Zwolle

In de bijsturing wordt geregeld wat deze nieuwe keringen zijn. Het is dan van belang om in korte tijd met zo min mogelijk veranderingen zoveel mogelijk treinen te blijven rijden. Het is belangrijk om zo dicht mogelijk bij het bestaande materieelplan te blijven omdat dit de kans dat het misgaat bij bijvoorbeeld andere stations verkleint. Het gaat bijvoorbeeld verkeerd wanneer er een trein met een andere materieelsoort gaat rijden terwijl deze een aantal ritten verder moet combineren. Omdat het niet mogelijk is om twee verschillende materieelsoorten te koppelen, kan deze kering niet langer uitgevoerd worden.

3.2 Wiskundig model TAM

TAM is oorspronkelijk ontwikkeld om een aangepaste materieelomloop te maken in de bijsturing. TAM maakt gebruik van een bestaand plan, omdat het in de bijsturing van belang is zo weinig mogelijk te wijzigen aan het huidige plan. Dit plan wordt als input meegegeven aan het model.

3.2.1 Doelfunctie

Er zijn een aantal parameters waar het model op kan sturen. Deze zijn onder te verdelen in drie categorieën:

- *Basiskosten*: hier worden de kosten aangegeven die voor het nieuwe plan gelden zonder enige vergelijking met het referentieplan. Zo gaat het om kosten per kilometer die een bak aflegt, kosten voor elke kilometer dat een trein met onvoldoende capaciteit rijdt en kosten voor rangeeractiviteiten.
- *Afwijkingen op rangeer activiteiten*: hier wordt er op gestuurd om alle rangeeractiviteiten zoveel mogelijk hetzelfde te houden als in het referentieplan. Zo zijn er kosten voor elke nieuwe rangeeractiviteit en kosten voor andere materieelsoorten bij het rangeren.
- *Afwijking op samenstelling*: hier worden er kosten aangegeven voor afwijkingen in de ritten ten opzichte van het bestaande plan. Er zijn bijvoorbeeld kosten voor afwijkende samenstellingen, voor een ander materieelsoort en wanneer er meer conducteurs nodig zijn.

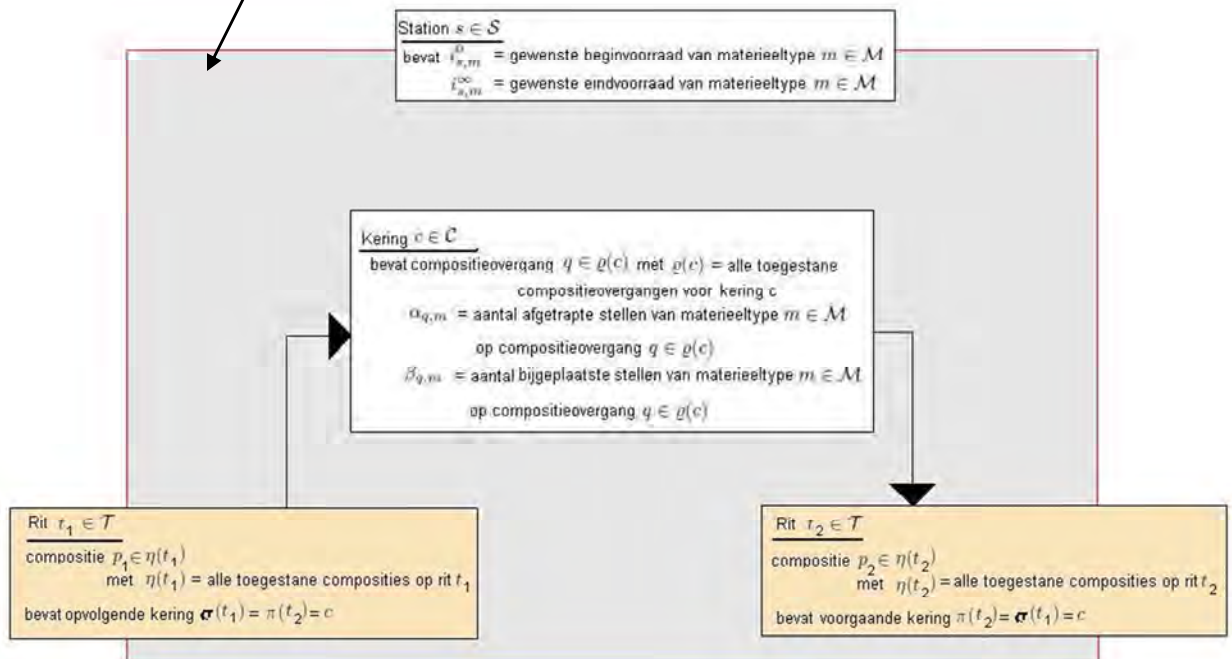
De doelfunctie $f(X, Z, I)$ is opgebouwd uit de kosten voor de drie categorieën die hierboven genoemd zijn. De gebruiker kiest zelf de hoogte van de kosten voor al deze parameters. Op deze manier kan hij zelf instellen of het plan zo dicht mogelijk bij het bestaande plan moet blijven, door de kosten voor afwijkingen aan het referentieplan hoog te maken, of om een zo efficiënt mogelijk plan te maken, door de basiskosten juist hoog te zetten. Het model minimaliseert de doelfunctie. De belangrijkste parameters van het model zijn te zien in Appendix E, in Tabel 23 en Tabel 24. De parameters in Tabel 23 vallen onder *Basiskosten* en *Afwijking op samenstelling* en zullen bij het testen van het model dezelfde waarde hebben. In Tabel 24 staan de parameters die vallen onder *Afwijking op rangeer activiteiten*, de waarden daarvan zullen bij het testen variëren.

3.2.2. Variabelen

De begrippen die in het model terugkomen zijn eerder in dit rapport besproken. In Figuur 13 is een uitvergroting te zien van het rode vierkant uit Figuur 12 in Utrecht waarop alle notaties voor de variabelen staan. In Figuur 13 zou t_1 voor de 3118 van Arnhem naar Utrecht Centraal staan en t_2 voor de 3118 van Utrecht naar Schiphol. Station s is dan Utrecht Centraal, met S een set van alle stations waar ritten beginnen en eindigen. Set M bevat alle mogelijk *materieeltypes*. Een materieeltype is een materieelsoort met een bepaalde lengte. De gewenste begin- en eindvoorraad worden gegeven in aantal stellen.



Figuur 12 Dienst van de OA24 waarbij in het rode vierkant in Utrecht (Ut) de variabelen uit het TAM model staan



Figuur 13 Variabelen van TAM in kaart gebracht

Een lijst van de notaties van deze variabelen is te vinden in Appendix D. Naast deze variabelen introduceert TAM zelf variabelen die nodig zijn om een oplossing te vinden. De notatie en betekenis van elk van deze variabelen staat in Tabel 3.

Tabel 3 Betekenis van de door TAM toegevoegde variabelen

Variabele	Betekenis
$X_{t,p} \in \{0,1\}$	Geeft aan of compositie $p \in \eta(t)$ gebruikt is voor rit $t \in T$.
$Z_{c,q} \in \{0,1\}$	Geeft aan of compositieovergang $q \in \rho(c)$ gebruikt is voor kering $c \in C$.
$I_{c,m} \in \mathbb{Z}_+$	Geeft het aantal stellen van materieeltype $m \in M$ in de voorraad van het station van kering $c \in C$ weer op het moment direct na de kering.
$I_{s,m}^0$ en $I_{s,m}^\infty \in \mathbb{Z}_+$	Geven het aantal stellen van type $m \in M$ op station $s \in S$ in het begin respectievelijk aan het einde van de te plannen periode.
$C_{c,m}$ en $U_{c,m} \in \mathbb{Z}_+$	Geven het aantal stellen van type $m \in M$ die zijn bijgeplaatst respectievelijk afgetrapt bij kering $c \in C$.

3.2.3 Het model

Nu de doelfunctie en de variabelen bekend zijn, kan het model achter TAM besproken worden. Dit model, weergegeven in Figuur 14, komt letterlijk uit het proefschrift van Nielsen [1], hoofdstuk 3.4.2. Het is een mixed integer programming model.

$$\begin{aligned} \min f(X, Z, I) & \quad (3.1) \\ \text{subject to} & \\ \sum_{p \in \eta(t)} X_{t,p} = 1 & \quad \forall t \in \mathcal{T} \quad (3.2) \\ X_{t,p} = \sum_{q \in \varrho(\sigma(t)): p_{q,t} = p} Z_{\sigma(t),q} & \quad \forall t \in \mathcal{T}, p \in \eta(t) \quad (3.3) \\ X_{t,p} = \sum_{q \in \varrho(\pi(t)): p'_{q,t} = p} Z_{\pi(t),q} & \quad \forall t \in \mathcal{T}, p \in \eta(t) \quad (3.4) \\ C_{c,m} = \sum_{q \in \varrho(c)} \beta_{q,m} Z_{c,q} & \quad \forall c \in \mathcal{C}, m \in \mathcal{M} \quad (3.5) \\ U_{c,m} = \sum_{q \in \varrho(c)} \alpha_{q,m} Z_{c,q} & \quad \forall c \in \mathcal{C}, m \in \mathcal{M} \quad (3.6) \\ I_{c,m} = I_{s(c),m}^0 - \sum_{\substack{c' \in \mathcal{C}: s(c') = s(c), \\ \tau^+(c') \leq \tau^+(c)}} C_{c',m} \\ & + \sum_{\substack{c' \in \mathcal{C}: s(c') = s(c), \\ \tau^-(c') \leq \tau^+(c)}} U_{c',m} \quad \forall c \in \mathcal{C}, m \in \mathcal{M} \quad (3.7) \\ I_{s,m}^\infty = I_{s,m}^0 - \sum_{\substack{c \in \mathcal{C}: \\ s(c) = s}} C_{c,m} + \sum_{\substack{c \in \mathcal{C}: \\ s(c) = s}} U_{c,m} & \quad \forall s \in \mathcal{S}, m \in \mathcal{M} \quad (3.8) \\ I_{s,m}^0 = i_{s,m}^0 & \quad \forall s \in \mathcal{S}, m \in \mathcal{M} \quad (3.9) \\ I_{s,m}^\infty = i_{s,m}^\infty & \quad \forall s \in \mathcal{S}, m \in \mathcal{M} \quad (3.10) \\ X_{t,p} \in \{0, 1\} & \quad \forall t \in \mathcal{T}, p \in \eta(t) \quad (3.11) \\ C_{c,m}, U_{c,m}, I_{c,m} \in \mathbb{R}_+ & \quad \forall c \in \mathcal{C}, m \in \mathcal{M} \quad (3.12) \\ I_{s,m}^0, I_{s,m}^\infty \in \mathbb{R}_+ & \quad \forall s \in \mathcal{S}, m \in \mathcal{M} \quad (3.13) \\ Z_{c,q} \in \mathbb{R}_+ & \quad \forall c \in \mathcal{C}, q \in \varrho(c) \quad (3.14) \end{aligned}$$

Figuur 14 Wiskundig model TAM

Dit model wordt toegelicht met behulp van de variabelen die zijn besproken in 3.2.2. De gebruiker kan, afhankelijk van het gewenste plan, kosten instellen voor diverse parameters. De doelfunctie (3.1) minimaliseert die kosten, gegeven de volgende beperkingen:

- (3.2) Aangezien $X_{t,p}$ aangeeft of compositie c bij een bepaalde rit t hoort, betekent deze beperking dat elke rit precies één compositie moet hebben van de voor die rit toegestane composities.
- (3.3) Bij de opvolgende compositieverandering van $X_{t,p}$ wordt een compositieverandering gekozen waarbij de compositie van $X_{t,p}$ een voorganger kan zijn.
- (3.4) Bij de voorgaande kring van $X_{t,p}$ wordt een compositieverandering gekozen waarbij de compositie van $X_{t,p}$ een opvolger kan zijn.
- (3.5) Het aantal bijgeplaatste stellen van materieeltype m in kring c is gelijk aan het aantal bijgeplaatste stellen van m in de compositieovergang die bij deze kring hoort. Omdat $Z_{c,q} \in \{0,1\}$ wordt $\beta_{q,m}$ alleen opgeteld als deze compositieovergang van toepassing is.
- (3.6) Het aantal afgetrapte stellen van materieeltype m in kring c is gelijk aan het aantal afgetrapte stellen van m in de compositieovergang die bij deze kring hoort. Omdat $Z_{c,q} \in \{0,1\}$ wordt $\alpha_{q,m}$ alleen opgeteld als deze compositieovergang van toepassing is.
- (3.7) De voorraad op station s op het moment van kring c , is gelijk aan de beginvoorraad op dat station min alle stellen die op eerdere kringen zijn bijgeplaatst en plus alle stellen die bij eerdere kringen zijn ontkoppeld.
- (3.8) De eindvoorraad op station s is de beginvoorraad min alle bijgeplaatste stellen plus alle afgetrapte stellen van alle kringen die op dat station hebben plaatsgevonden.
- (3.9) De beginvoorraad moet gelijk zijn aan de gegeven beginvoorraad.
- (3.10) De eindvoorraad moet gelijk zijn aan de gegeven eindvoorraad.
- (3.11) Dit zorgt ervoor dat $X_{t,p}$ voor alle mogelijke ritten en composities 0 of 1 is.
- (3.12) De variabelen moeten niet-negatief zijn, maar het is niet nodig dat het gehele getallen zijn.
- (3.13) De variabelen moeten niet-negatief zijn, maar het is niet nodig dat het gehele getallen zijn.
- (3.14) De variabelen moeten niet-negatief zijn, maar het is niet nodig dat het gehele getallen zijn.

De functies voor het berekenen van de kosten voor de parameters uit de doelfunctie zullen niet worden behandeld, omdat zij voor dit onderzoek niet van belang zijn.

3.3 Wiskundig model flexibele keringen

Een uitbreiding op het model achter TAM is om TAM zelf de keringen te laten kiezen. Het voordeel van TAM keringen te laten kiezen in plaats van deze van tevoren vast te leggen, is dat er een betere materieelomloop uit kan komen. Er worden namelijk beperkingen weggehaald die de oplossing suboptimaal kunnen maken. Nielsen [1] bespreekt een methode om dit in te voeren.

3.3.1 Variabelen

Deze methode maakt bij elk station gebruik van een *verzameling van composities*: een aantal samenstellingen waar elke vertrekkende trein uit kan kiezen. Deze verzameling van composities wordt als volgt gedefinieerd:

- Voor elke aankomende rit worden de samenstellingen opgeslagen met 0 of meer afgetrapte stellen van alle toegestane composities.
- Deze verzameling wordt genoteerd met $UN_{p,t}$.
- Voor elke vertrekkende rit worden voor elke toegestane compositie de samenstellingen opgeslagen met 0 of meer bijgeplaatste stellen.
- Deze verzameling wordt genoteerd met $CO_{p,t}$.

Gezamenlijk vormen $UN_{p,t}$ en $CO_{p,t}$ de verzameling van composities op een bepaald station.

$UN_{p,t}$ is dus gekoppeld aan de aankomende ritten, terwijl $CO_{p,t}$ bij de vertrekkende ritten hoort. Dit heeft te maken met de volgorde van rangers bij de NS. Er geldt namelijk dat er eerst wordt afgetrapt, dan vindt de kering plaats en tot slot wordt er bijgeplaatst. Aftrappen gebeurt dus op de voorgaande rit, bijplaatsen op de opvolgende rit. Als gevolg hiervan hoort $UN_{p,t}$ bij de aankomende ritten en $CO_{p,t}$ bij de vertrekkende.

Daarnaast worden er variabelen gedefinieerd om aan te geven of een bepaalde compositie gekozen is. Variabele $Y_{t,p,p'} \in \{0,1\}$ geeft aan of een relevante inkomende rit $t \in T$ aangekomen is met compositie $p \in \eta(t)$ en compositie $p' \in UN_{p,t}$ achterlaat op het perron. Eventuele afgetrapte stellen gaan naar de voorraad van het station. Evenzo geeft $W_{t,p,p'} \in \{0,1\}$ aan of een relevante vertrekkende rit $t \in T$ met compositie $p \in \eta(t)$ gebruik maakt van compositie $p' \in CO_{p,t}$. Eventuele bijgeplaatste stellen komen uit de voorraad van het station.

Ten slotte zijn nog een aantal variabelen nodig om het model te definiëren. Deze worden weergegeven in Tabel 4.

Tabel 4 Toegevoegde variabelen aan de uitbreiding

Variabele	Betekenis
$v_m(p)$	Het aantal stellen van type m in samenstelling p .
$\delta_m(p, p')$	Het verschil in het aantal stellen van type m tussen p en p' . Dit wordt berekend door $v_m(p)$ min $v_m(p')$.
\bar{c}	Alle keringen die plaatsvinden op een gegeven station.
$P_{c,p} \in \mathbb{Z}_+$	Aantal treinen met compositie p die op station $s(c)$ staan op het moment van kering c .

3.3.2 Het model

$$\min f(X, Z, I) \quad (3.1)$$

subject to

$$\sum_{p \in \eta(t)} X_{t,p} = 1 \quad \forall t \in \mathcal{T} \quad (3.2)$$

$$X_{t,p} = \sum_{q \in \rho(\sigma(t)): p_{q,t} = p} Z_{\sigma(t),q} + \sum_{p' \in \text{UN}_{p,t}} Y_{t,p,p'} \quad \forall t \in \mathcal{T}_1, p \in \eta(t) \quad (3.24)$$

$$X_{t,p} = \sum_{q \in \rho(\pi(t)): p'_{q,t} = p} Z_{\pi(t),q} + \sum_{p' \in \text{CO}_{p,t}} W_{t,p,p'} \quad \forall t \in \mathcal{T}_2, p \in \eta(t) \quad (3.25)$$

$$C_{c,m} = \sum_{q \in \rho(c)} \beta_{q,m} Z_{c,q} + \sum_{t \in \text{OUT}_c} \sum_{p \in \eta(t)} \sum_{p' \in \text{CO}_{p,t}} \delta_m(p,p') W_{t,p,p'} \quad \forall c \in \tilde{\mathcal{C}}, m \in \mathcal{M} \quad (3.26)$$

$$U_{c,m} = \sum_{q \in \rho(c)} \alpha_{q,m} Z_{c,q} + \sum_{t \in \text{IN}_c} \sum_{p \in \eta(t)} \sum_{p' \in \text{UN}_{p,t}} \delta_m(p,p') Y_{t,p,p'} \quad \forall c \in \tilde{\mathcal{C}}, m \in \mathcal{M} \quad (3.27)$$

$$P_{c,p} = \sum_{\substack{c' \in \tilde{\mathcal{C}}: s(c') = s(c), \\ \tau_a(c') < \tau_d(c)}} \sum_{t \in \text{IN}_{c'}} \sum_{p': p \in \text{UN}_{p',t}} Y_{t,p',p} - \sum_{\substack{c' \in \tilde{\mathcal{C}}: s(c') = s(c), \\ \tau_d(c') < \tau_d(c)}} \sum_{t \in \text{OUT}_{c'}} \sum_{p': p \in \text{CO}_{p',t}} W_{t,p',p} \quad \forall c \in \tilde{\mathcal{C}}, p \in \mathcal{P} \quad (3.28)$$

$$I_{c,m} = I_{s(c),m}^0 - \sum_{\substack{c' \in \mathcal{C}: s(c') = s(c), \\ \tau^+(c') \leq \tau^+(c)}} C_{c',m} + \sum_{\substack{c' \in \mathcal{C}: s(c') = s(c), \\ \tau^-(c') \leq \tau^+(c)}} U_{c',m} \quad \forall c \in \mathcal{C}, m \in \mathcal{M} \quad (3.7)$$

$$I_{s,m}^\infty = I_{s,m}^0 - \sum_{\substack{c \in \mathcal{C}: \\ s(c) = s}} C_{c,m} + \sum_{\substack{c \in \mathcal{C}: \\ s(c) = s}} U_{c,m} + \sum_{\substack{c \in \tilde{\mathcal{C}}: \\ s(c) = s}} \sum_{t \in \text{IN}_c} \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{p' \in \text{UN}_{p,t}} \nu_m(p') Y_{t,p,p'} - \sum_{\substack{c \in \tilde{\mathcal{C}}: \\ s(c) = s}} \sum_{t \in \text{OUT}_c} \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{p' \in \text{CO}_{p,t}} \nu_m(p') W_{t,p,p'} \quad \forall m \in \mathcal{M} \quad (3.29)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} P_{c,p} + \sum_{\substack{c' \in \mathcal{C}: s(c') = s(c), \\ \tau_a(c') \leq \tau_d(c) \leq \tau_d(c')}} \sum_{q \in \rho(c')} Z_{c',q} \leq \text{plat}(s(c)) \quad \forall c \in \tilde{\mathcal{C}} \quad (3.30)$$

Figuur 15 Wiskundig model uitbreiding

In Figuur 15 is het wiskundig model van TAM te zien, met daarin de uitbreiding van flexibele keerpatronen. De doelfunctie (3.1) is hetzelfde genoteerd, al kunnen er eventueel kosten worden toegevoegd voor het kiezen van een flexibele kering, hierover later meer. Ook beperking (3.2) is hetzelfde gebleven, deze geeft aan dat er voor elke rit precies één compositie gekozen wordt. Hierna zijn een aantal veranderingen.

- (3.24) Dit is een uitbreiding van eerdere beperking (3.3). Voor $X_{t,p}$ zijn er nu twee mogelijkheden. De eerste mogelijkheid is dat een compositieverandering gekozen wordt waarbij de compositie van $X_{t,p}$ een voorganger kan zijn. Hierbij wordt er dus gebruik gemaakt van een bestaande kering. De tweede mogelijkheid is dat TAM kiest voor een flexibele kering door (een deel van) compositie p naar de verzameling van composities te sturen, deze komt dan in $UN_{p,t}$ terecht.
- (3.25) Dit is een uitbreiding van eerdere beperking (3.4). Voor $X_{t,p}$ zijn er nu twee mogelijkheden. De eerste mogelijkheid is dat een compositieverandering gekozen wordt waarbij de compositie van $X_{t,p}$ een opvolger kan zijn. Hierbij wordt er dus gebruik gemaakt van een bestaande kering. De tweede mogelijkheid is dat TAM kiest voor een flexibele kering door (een deel van) compositie p van de verzameling van composities te halen, deze komt dus uit $CO_{p,t}$.
- (3.26) Dit is een uitbreiding van beperking (3.5). Wanneer er niet wordt gekozen voor een bestaande kering maar voor een flexibele kering, moet het aantal bijgeplaatste stellen uit die flexibele kering berekend worden. Hierbij wordt er voor alle uitgaande ritten t en elk van de bijbehorende toegestane composities p voor de gekozen compositie $p' \in CO_{p,t}$ berekend hoeveel stellen er bijgeplaatst zijn.
- (3.27) Dit is een uitbreiding van beperking (3.6). Wanneer er niet wordt gekozen voor een bestaande kering maar voor een flexibele kering, moet het aantal afgetrapte stellen uit die flexibele kering berekend worden. Hierbij wordt er voor alle inkomende ritten t en elk van de bijbehorende toegestane composities p voor de gekozen compositie $p' \in UN_{p,t}$ berekend hoeveel stellen er afgetrappt zijn.
- (3.28) Het aantal treinen met compositie p die op station $s(c)$ staan op het moment van kering c wordt berekend door het aantal keer dat compositie p is achtergelaten min het aantal keer dat compositie p is gekozen in de tijd tot aan kering c . Er wordt dus van uitgegaan dat de verzameling van composities in het begin leeg is.
- (3.7) Omdat de verzameling van composities in het begin leeg is, kan de beginvoorraad op dezelfde manier berekend worden als eerst. Deze beperking is dus niet gewijzigd.
- (3.29) Aan het einde van de planningsperiode kunnen er nog composities in de verzameling van composities zijn. Deze composities worden dan toegevoegd aan de eindvoorraad.

- (3.30) Het aantal composities in de verzameling van composities mag op geen enkel moment groter zijn dan het aantal beschikbare perrons op het gegeven station.

Naast deze beperkingen wordt ook het domein voor alle variabelen gegeven, dit is te zien in Figuur 16.

$I_{s,m}^0 = i_{s,m}^0$	$\forall s \in \mathcal{S}, m \in \mathcal{M}$	(3.9)
$I_{s,m}^\infty = i_{s,m}^\infty$	$\forall s \in \mathcal{S}, m \in \mathcal{M}$	(3.10)
$X_{t,p} \in \{0, 1\}$	$\forall t \in \mathcal{T}, p \in \eta(t)$	(3.11)
$C_{c,m}, U_{c,m}, I_{c,m} \in \mathbb{R}_+$	$\forall c \in \mathcal{C}, m \in \mathcal{M}$	(3.12)
$I_{s,m}^0, I_{s,m}^\infty \in \mathbb{R}_+$	$\forall s \in \mathcal{S}, m \in \mathcal{M}$	(3.13)
$Z_{c,q} \in \mathbb{R}_+$	$\forall c \in \mathcal{C}, q \in \varrho(c)$	(3.14)
$P_{c,p} \in \mathbb{Z}_+$	$\forall c \in \tilde{\mathcal{C}}, p \in \mathcal{P}$	(3.31)
$Y_{t,p,p'} \in \{0, 1\}$	$\forall t \in \mathcal{T}_1, p \in \eta(t), p' \in \text{UN}_{p,t}$	(3.32)
$W_{t,p,p'} \in \{0, 1\}$	$\forall t \in \mathcal{T}_2, p \in \eta(t), p' \in \text{CO}_{p,t}$	(3.33)

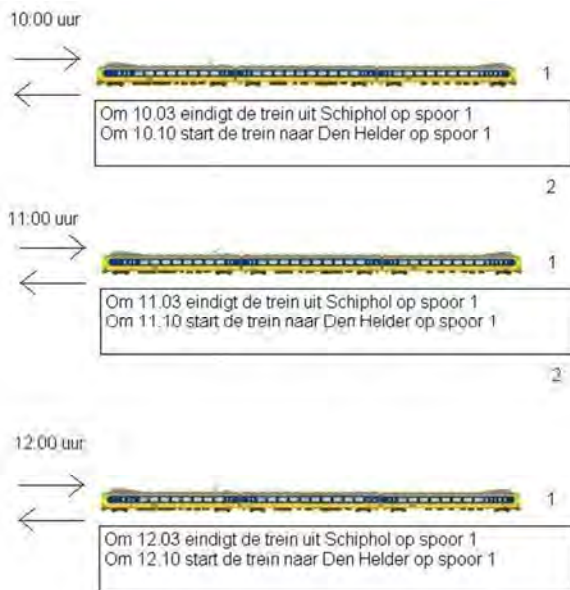
Figuur 16 Domein van de variabelen in de uitbreiding

Het is mogelijk om het gebruik van flexibele keringen te ontmoedigen. In dat geval moet de doelfunctie worden aangepast door voor elke keer dat de verzameling van composities gebruikt is, kosten toe te kennen. Het testen van flexibele keringen zal in Hoofdstuk 5 gebeuren *met* en *zonder* kosten voor het gebruik van de verzameling van composities.

4. Uitbreiden naar flexibele keerpatronen

De voorkeur van de Nederlandse Spoorwegen is om zoveel mogelijk in eenzelfde patroon te keren. In dit hoofdstuk wordt eerst uitgelegd wat een keerpatroon is en wat de voordelen ten opzichte van losse keringen zijn. Vervolgens wordt vastgesteld wanneer twee keringen onder hetzelfde keerpatroon vallen. Tot slot wordt besproken hoe dit in het model verwerkt kan worden. Dit onderdeel is niet verwerkt in TAM en kan dus ook niet getest worden.

4.1 Keerpatronen



Figuur 17 Voorbeeld van een keerpatroon

In Figuur 18 zijn dezelfde treinen te zien, maar nu is er ieder uur een andere kering. Gevolg is dat de trein uit Schiphol op twee verschillende sporen arriveert en evenzo vertrekt de trein naar Den Helder van twee verschillende sporen. Zelfs in dit kleine voorbeeld zijn de verschillen tussen losse keringen en een keerpatroon al duidelijk te zien. In de praktijk gaat het om veel meer treinen en meer sporen, gevolg daarvan is dat de verschillen tussen de keringen nog groter zijn.

Een keerpatroon ziet er als volgt uit: Op station A keert treinserie x altijd na z minuten op treinserie y. Een eenvoudig voorbeeld van een keerpatroon in Nijmegen is te zien in Figuur 17. Hier zijn twee sporen te zien. Op spoor 1 keert de 3100 uit Schiphol altijd op de 3000 richting Den Helder die zeven minuten later vertrekt.



Figuur 18 Voorbeeld van keringen zonder patroon

Een keerpatroon heeft een paar voordelen.

1. Het is voorspelbaar voor de reiziger. De treinen die hetzelfde keerpatroon hebben komen namelijk steeds op hetzelfde spoor aan en vertrekken ook steeds van dat spoor. Dit is terug te zien in Figuur 17.
2. Het plannen bij de stations is gemakkelijker wanneer treinseries in een patroon keren. Er hoeft dan namelijk per keerpatroon maar voor één instantie een planning gemaakt te worden. Deze planning kan dan gebruikt worden voor alle treinen van datzelfde keerpatroon. Zo is ook al te zien dat de situatie in Figuur 18 lastiger in te plannen is dan de situatie van Figuur 17. Dit geldt zeker wanneer er bij het keren gerangeerd moet worden en als er meer treinen en sporen zijn.

4.2 Definitie

In het voorgaande gedeelte is uitgelegd wat een keerpatroon is. In dit onderdeel wordt gespecificeerd wanneer twee keringen onder hetzelfde keerpatroon vallen. Twee keringen vallen onder hetzelfde keerpatroon wanneer ze de volgende eigenschappen gemeen hebben:

1. hetzelfde aantal voorgangers
2. hetzelfde aantal opvolgers
3. de treinserie(s) van de trein(en)
4. de tijd tussen aankomst en vertrek van de treinen

Ter illustratie hiervan worden hieronder drie keringen in Nijmegen weergegeven, waarvan twee onder hetzelfde patroon vallen.

1. De 3129 keert op de 3134
2. De 3139 keert op de 3044
3. De 3153 keert op de 3158

Kering 1 en kering 3 vallen onder hetzelfde keerpatroon. Kering 2 valt niet onder dit patroon, omdat de opvolgende trein bij een andere treinserie hoort. De tijd tussen de voorgaande en opvolgende trein is bij alle drie de keringen wel gelijk.

4.3 Keerpatronen in het model

Er zijn twee manieren om keerpatronen te verwerken in het model.

1. Het verplichten van keerpatronen. Alle treinen van een bepaalde treinserie die op een station binnenkomen vallen onder één keerpatroon. Er mag in dat geval slechts één keerpatroon zijn per treinserie per station.
2. Het sturen van het model op keerpatronen. Hierbij is het niet verplicht dat alle treinen van één treinserie op een bepaald station onder hetzelfde keerpatroon vallen, maar het aantal keerpatronen wordt beperkt.

Het verplichten van één keerpatroon is in de praktijk niet uitvoerbaar, aangezien voornamelijk in het begin en eind van de dag treinen een afwijkend begin- of eindstation kunnen hebben. Hierdoor kunnen sommige keringen op dat moment niet meer uitvoerbaar zijn. Daarnaast geeft het verplichten van één keerpatroon een onnodige beperking aan het model waardoor mogelijk suboptimale oplossingen gevonden worden. Om deze reden zal hier alleen de tweede manier onderzocht worden: het sturen van het model op keerpatronen.

Het model minimaliseert de doelfunctie, welke is opgebouwd uit de parameters die te vinden zijn in Appendix E, met de meegegeven waarden. Om te sturen op flexibele keerpatronen kunnen aan deze doelfunctie kosten worden toegevoegd voor het aantal keerpatronen dat op een station gebruikt wordt. Hiervoor worden extra variabelen aan het model toegevoegd. Deze staan in Tabel 5.

Tabel 5 Betekenis van de variabelen voor keerpatronen

Notatie	Betekenis
TP	Verzameling van alle mogelijke keerpatronen
$tp \in TP$	Een keerpatroon
$V_s \in \mathbb{Z}_+$	Aantal verschillende keerpatronen $tp \in TP$ op station $s \in S$
$X_{tp,s} \in \{0,1\}$	Geeft aan of $tp \in TP$ gebruikt is op station $s \in S$

De volgende voorwaarde wordt vervolgens aan het model toegevoegd:

$$V_s = \sum_{tp \in TP} X_{tp,s} \quad \forall s \in S \quad (3.34)$$

Deze voorwaarde heeft de volgende betekenis:

- (3.34) Het totaal aantal verschillende keerpatronen op station $s \in S$ is de som van alle keerpatronen $tp \in TP$ die op station $s \in S$ voorkomen.

Ten slotte moet de doelfunctie worden aangepast, zodanig dat het model daadwerkelijk stuurt op het beperken van het aantal keerpatronen. De factor $\sum_{s \in S} \gamma V_s$ wordt aan de doelfunctie toegevoegd, waarbij γ de door de gebruiker ingestelde kosten per gebruikt keerpatroon is. Op deze manier stuurt het model op het beperken van het aantal keerpatronen. De uitbreiding naar keerpatronen is niet in het model geïmplementeerd en dus ook niet opgenomen in de resultaten.

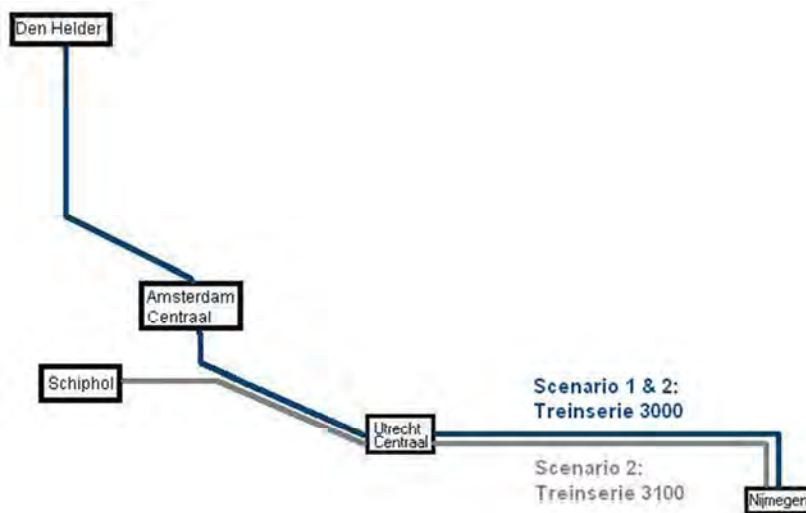
5. Resultaten

In dit hoofdstuk wordt bekeken hoe de methode *met* flexibele keringen presteert in vergelijking met de methode *zonder* flexibele keringen. Dit gebeurt aan de hand van een aantal testscenario's. Eerst worden de geteste scenario's besproken. Vervolgens staan de resultaten voor beide methodes per scenario. Het gebruik van flexibele keerpatronen komt niet voor in de resultaten.

5.1 Scenario's

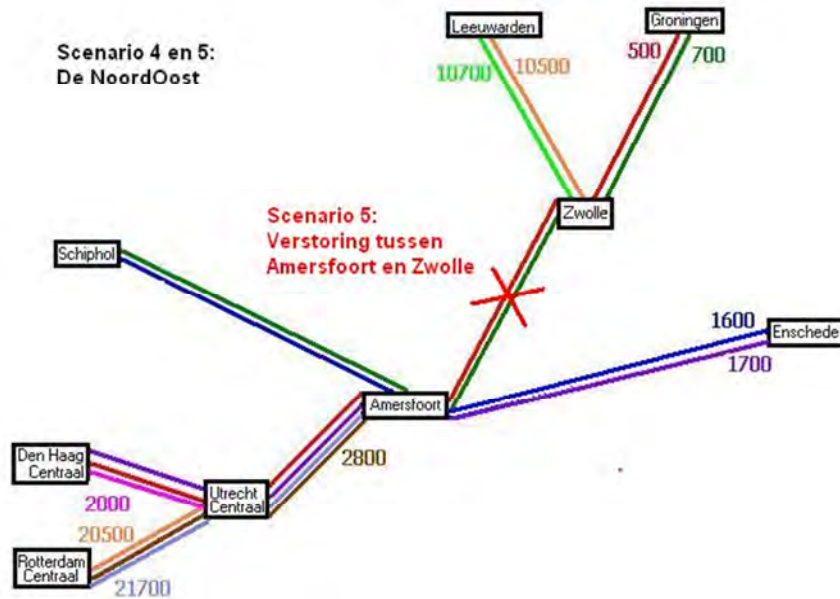
De geïmplementeerde methode wordt getest aan de hand van vijf testscenario's. Voor elk scenario wordt er een materieelplan gemaakt door TAM *met* en *zonder* flexibele keringen. Aan de hand van de rekentijd, aantal bakkilometers en een aantal belangrijke parameters worden de plannen vergeleken. De scenario's zijn oplopend in complexiteit.

- In scenario 1 wordt treinserie 3000 behandeld, dit is de treinserie van Den Helder naar Nijmegen en vice versa.
- Scenario 2 bevat treinseries 3000 (Den Helder <-> Nijmegen) en 3100 (Schiphol <-> Nijmegen). De eerste twee scenario's zijn schematisch weergegeven in Figuur 19.



Figuur 19 Scenario's 1 en 2 schematisch weergegeven

- Scenario 3 bevat alle treinstellen van materieelsoort ICM. Deze treinstellen rijden op een heleboel (delen van) treinseries door het hele land en zijn dus niet overzichtelijk in kaart te brengen.
- In Scenario 4 worden de 10 treinseries gepland die gezamenlijk de NoordOost vormen. De NoordOost is besproken in sectie 2.2.1.
- In Scenario 5 wordt ook de NoordOost gepland, maar dan met een verstoring tussen Amersfoort en Zwolle. Bij een verstoring legt de bijsturing keringen in volgens een bepaalde maatregel. Scenario's 4 en 5 zijn schematisch weergegeven in Figuur 20.



Figuur 20 Scenario's 4 en 5 schematisch weergegeven

In Tabel 6 staan een aantal kenmerken van de vijf geteste scenario's.

Tabel 6 De vijf geteste scenario's

Scenario	Aantal treinseries	Aantal geplande treinstellen	Van	Naar	Aantal stations met flexibele keringen	Bijzonderheden
1	1	26	Den Helder	Nijmegen	1 en 2	
2	2	47	Den Helder, Schiphol	Nijmegen	1	
3	25 ¹	122			1 en 2	Al het ICM materieel
4	10	117	Schiphol, Den Haag Centraal, Rotterdam Centraal	Enschede, Groningen, Leeuwarden	2	De NoordOost
5	10	117	Schiphol, Den Haag Centraal, Rotterdam Centraal	Enschede, Groningen, Leeuwarden	2	De NoordOost met een verstoring tussen Amersfoort en Zwolle

¹ Dit is het aantal treinseries waarvan minstens één treinnummer met ICM gereden wordt. Niet de volledige treinserie wordt dus gepland, maar alleen de treinen waar ICM op gepland stond.

Hoewel scenario 3 meer treinstellen en treinseries bevat dan scenario's 4 en 5, wordt er in scenario's 1, 2 en 3 met slechts één materieelsoort, VIRM, gereden en in scenario's 4 en 5 met twee, VIRM en ICM. Dit zorgt ervoor dat scenario's 4 en 5 complexer zijn dan scenario 3. Dit zal ook blijken uit de rekestijd. Alle treinseries worden in beide richtingen gepland, de kolommen 'Van' en 'Naar' geven aan dat de treinseries op elke combinatie van 'Van' station met een 'Naar' station gepland zijn. Van scenario's 1, 2, 4 en 5 zijn deze stations en de treinseries te vinden in eerdergenoemde Figuur 19 en Figuur 20.

Per scenario worden verschillende parameters aan de doelfunctie meegegeven. De meegegeven parameters staan in Appendix E in Tabel 23 en Tabel 24, waarbij de waarden van de parameters in Tabel 23 gelijk blijven en de waarden van de parameters in Tabel 24 gevarieerd worden voor drie mogelijkheden. Deze drie mogelijkheden zijn de volgende:

1. *Standaard instellingen*. De parameters hebben de waarden die op de planningsafdeling gebruikt worden wanneer een nieuwe materieelomloop gemaakt wordt.
2. *Hoge Rangeerkosten*. Hierbij zijn de kosten voor het rangeren heel hoog en de kosten voor het annuleren van een rangeeractiviteit laag. De verwachting is dat het model eerder ervoor kiest om een nieuwe kring te maken dan om te rangeren.
3. *Lage Rangeerkosten*. De kosten voor het rangeren zijn nu laag en de kosten voor het annuleren van een rangeeractiviteit hoog. De verwachting is dat het model eerder ervoor kiest om te rangeren dan gebruik te maken van de verzameling van composities.

Daarnaast wordt er nog gevarieerd met twee mogelijkheden voor de kosten voor het gebruik van flexibel kernen. De eerste mogelijkheid is dat het gebruik van flexibel kernen geen kosten meebrengt, de tweede mogelijkheid is dat elk gebruik van de verzameling van samenstellingen kosten tien heeft. Deze mogelijke acties bij flexibel kernen staan in Appendix E in Tabel 25.

Bij de geteste scenario's wordt er dus gevarieerd met de stations waar flexibel kernen is toegestaan, de waarde van de parameters voor rangeren en de waarden van de parameters die bij de pool horen. Niet alle scenario's worden getest met alle mogelijkheden, dit komt door de rekestijd van de complexere problemen en de overlap in resultaten van sommige instellingen. Dit wordt later nader toegelicht.

De verwachting is dat er bij hoge rangeerkosten en geen kosten voor het gebruik van de verzameling van composities vaker een flexibele kring wordt gekozen dan wanneer er lage rangeerkosten zijn en wel kosten voor het gebruik van de verzameling van composities. Bij het maken van een flexibele kring kan het rangeren namelijk vermeden worden. Daarnaast is de verwachting dat de rekestijd van het model bij het gebruik van flexibele stations hoger is, aangezien het probleem groter wordt wanneer het model meerdere keuzes heeft voor een kring. Hoe meer stations waar flexibel kernen is toegestaan, hoe hoger de rekestijd.

5.2 Scenario 1: Treinserie 3000

In Scenario 1 wordt treinserie 3000, tussen Den Helder en Nijmegen, gepland met 26 stellen VIRM. De geteste instellingen bij dit scenario staan in Tabel 7. In totaal zijn er vijftien materieelomlopen gemaakt: drie voor de verschillende rangeerkosten zonder gebruik van flexibele keringen en 3 (Rangeerkosten) * 2 (Flexibele stations) * 2 (Kosten voor de pool) = 12 materieelomlopen waarbij gebruik kan worden gemaakt van flexibele keringen.

Tabel 7 Geteste instellingen scenario 1

Onderdeel	Geteste instellingen
Rangeerkosten	Standaard instellingen, Hoge Rangeerkosten, Lage Rangeerkosten
Flexibele stations	Geen, twee sporen in Nijmegen, twee sporen in Nijmegen en één spoor in Den Helder
Kosten voor flexibel keren	<i>Wel</i> en <i>geen</i> kosten voor gebruik van de verzameling van composities

De resultaten worden gemiddeld bekeken in twee groepen. Allereerst worden alle resultaten gegroepeerd naar hoe vaak flexibel keren mogelijk is. Er zijn dan drie groepen: *flexibel keren is niet mogelijk*, *flexibel keren is mogelijk op twee sporen in Nijmegen* en *flexibel keren is mogelijk op twee sporen in Nijmegen en op één spoor in Den Helder*. De gemiddelde resultaten hiervan zijn te zien in Tabel 8. Het gemiddelde percentage flexibele keringen is het percentage flexibele keringen van alle keringen op stations waar flexibel keren mogelijk is.

Tabel 8 Resultaten scenario 1 gegroepeerd naar flexibel keren

Flexibel keren	Gemiddeld aantal bak-kilometers	Gemiddeld aantal kilometers over de norm	Gemiddeld aantal rangeer-activiteiten	Gemiddeld percentage flexibele keringen	Gemiddelde rekestijd in seconden
Niet	96080	433	76,3	-	0,35
Nijmegen	100741	0	75,5	0,0%	0,25
Nijmegen en Den Helder	98551	28	77,8	13,2%	0,38

Zoals verwacht ligt de rekestijd hoger wanneer flexibel keren mogelijk is op de stations Nijmegen en Den Helder. Wanneer flexibel keren alleen in Nijmegen mogelijk is, is de gemiddelde rekestijd het kortst. Bij deze omlopen wordt geen gebruik gemaakt van flexibele keringen. Het is mogelijk dat flexibel keren zo nadelig was, dat dit geen optie meer vormde voor het model. Een reden dat de gemiddelde rekestijd lager ligt, kan zijn dat het model niet meer behoefde te kijken naar flexibele keringen. Dit verklaart niet waarom de gemiddelde rekestijd lager is dan bij de plannen waarbij flexibel keren niet mogelijk is.

Naast de aspecten uit Tabel 8 is het ook interessant om te kijken naar het aantal wijzigingen ten opzichte van het referentieplan. In sectie 2.4 is toegelicht dat het wenselijk is zo min mogelijk hieraan te wijzigen. In Tabel 9 staan het aantal wijzigingen ten opzichte van het referentieplan gegroepeerd naar het aantal stations waar flexibel keren mogelijk is. Het

gemiddeld aantal ritten boven de norm geeft het aantal ritten waarbij er minder capaciteit is dan de normering. Dat heeft tot gevolg dat er bijvoorbeeld reizigers moeten staan. De materieelomlopen waarbij flexibel keren niet mogelijk is, hebben minder ritten boven de norm. Ook het aantal geraakte rangeeractiviteiten en het aantal ritten met minder capaciteit is lager, terwijl het aantal ritten met meer capaciteit juist hoger is.

Tabel 9 Wijzigingen tov referentieplan voor scenario 1

Flexibel keren	Gemiddeld aantal ritten boven de norm	Gemiddeld aantal geraakte rangeeractiviteiten	Gemiddeld aantal ritten met minder capaciteit	Gemiddeld aantal ritten met meer capaciteit
Niet	7	15	16	29
Nijmegen	3	9	4	43
Nijmegen en Den Helder	2	5	8	40

Ten tweede worden de resultaten gegroepeerd naar ingestelde rangeerkosten. De drie groepen zijn dan: *Lage Rangeerkosten*, *Standaard Rangeerkosten* en *Hoge Rangeerkosten*. De resultaten hiervan staan in Tabel 10.

Tabel 10 Resultaten scenario 1 gegroepeerd naar rangeerkosten

Rangeerkosten	Gemiddeld aantal bakkilometers	Gemiddeld aantal kilometers over de norm	Gemiddeld aantal rangeeractiviteiten	Gemiddeld percentage flexibele keringen	Gemiddelde rekestijd in seconden
Laag	98064	98	80,6	1,0%	0,34
Standaard	99113	130	75,0	1,8%	0,33
Hoog	99621	65	74,2	1,6%	0,30

De rekestijd bij hoge rangeerkosten is lager dan bij de standaardinstellingen en bij lage rangeerkosten. Een verklaring hiervoor is dat hogere rangeerkosten resulteert in minder interessante opties voor het model. Het gemiddeld aantal rangeeractiviteiten is volgens verwachting het hoogst bij lage rangeerkosten en het laagst bij hoge rangeerkosten. Bij lage rangeerkosten is het mogelijk de treinen vaker aan te passen op het verwachte aantal reizigers. Als gevolg hiervan hebben materieelomlopen met lage rangeerkosten gemiddeld het laagst aantal bakkilometers en niet het hoogste aantal kilometers over de norm. De materieelomlopen met hoge rangeerkosten hebben gemiddeld de meeste bakkilometers maar de minste aantal kilometers over de norm. Dit is een indicatie dat de treinen vaker groter hebben gereden dan nodig op basis van de reizigersprognose.

In Tabel 10 is te zien dat het gemiddeld percentage flexibele keringen op stations waar dit mogelijk is, niet boven de 2% komt. Uit Tabel 26 blijkt dat dit komt omdat er op Nijmegen geen flexibele keringen zijn. In Den Helder is het gemiddelde percentage flexibele keringen 26,4%. De tabel met alle resultaten is te vinden in Appendix F in Tabel 26.

5.3 Scenario 2: Treinseries 3000 en 3100

Treinserie 3000 rijdt tussen Den Helder en Nijmegen en treinserie 3100 rijdt tussen Schiphol en Nijmegen. Beide series hebben dus als begin- of eindstation Nijmegen. In dit scenario wordt gekeken wat de invloed is van flexibele keringen in Nijmegen op de materieelomloop. Met flexibel keren is het mogelijk dat het materieel van de ene serie in Nijmegen keert op de andere serie.

In totaal zijn er negen materieelomlopen gemaakt voor dit scenario: drie omlopen zonder gebruik van de pool en gevarieerd in instellingen voor rangeerkosten en 3 * (mogelijke rangeerkosten) * 1 (flexibel keren in Nijmegen) * 2 (wel of geen kosten voor gebruik van de verzameling van composities) = 6 omlopen met de mogelijkheid tot flexibel keren. De mogelijke instellingen staan in Tabel 11.

Tabel 11 Mogelijke instellingen voor scenario 2

Onderdeel	Geteste instellingen
Rangeerkosten	Standaard instellingen, Hoge Rangeerkosten, Lage Rangeerkosten
Flexibele stations	Geen, twee sporen in Nijmegen
Kosten voor de pool	<i>Wel</i> en <i>geen</i> kosten voor de pool

Evenals bij scenario 1, zijn de resultaten op twee manieren gegroepeerd. In Tabel 12 staan de resultaten gegroepeerd naar flexibel keren. De rekestijd voor de omlopen waarbij flexibel keren mogelijk is, is gemiddeld 229% hoger dan de rekestijd voor omlopen zonder flexibel keren. Dat deze rekestijd hoger ligt, is volgens verwachting omdat het probleem *met* flexibele keringen veel groter is. Daarnaast is zowel het gemiddeld aantal bakkilometers als het gemiddeld aantal kilometers over de norm als het gemiddeld aantal rangeeractiviteiten hoger dan wanneer er geen mogelijkheid is tot flexibel keren.

Tabel 12 Resultaten scenario 2 gegroepeerd naar flexibel keren

Flexibel keren	Gemiddeld aantal bakkilometers	Gemiddeld aantal kilometers over de norm	Gemiddeld aantal rangeeractiviteiten	Gemiddeld percentage flexibele keringen	Gemiddelde rekestijd in seconden
Niet	139891	925	132	-	0,40
Nijmegen	144846	1148	140	24,5%	1,33

In Tabel 13 staan de wijzigingen ten opzichten van het referentieplan. Flexibel keren resulteert bij dit scenario in minder ritten boven de norm, minder geraakte rangeeractiviteiten en minder ritten met minder capaciteit. Ook zijn er minder ritten met meer capaciteit, maar de verhouding ritten met minder capaciteit/ritten met meer capaciteit is bij flexibel keren beter dan wanneer flexibel keren niet mogelijk is. Dat wil zeggen, ten opzichte van het aantal ritten met minder capaciteit zijn er bij de plannen waarbij flexibel keren mogelijk is meer ritten met meer capaciteit.

Tabel 13 Wijzingen t.o.v. het referentieplan voor scenario 2 gegroepeerd naar flexibel keren

Flexibel keren	Aantal ritten boven de norm	Gemiddeld aantal geraakte rangeeractiviteiten	Gemiddeld aantal ritten met minder capaciteit	Gemiddeld aantal ritten met meer capaciteit
Niet	8	32	42	64
Nijmegen	4	24	6	54

Tabel 14 geeft de waarden gegroepeerd naar instellingen voor rangeerkosten. Hierin is te zien dat de gemiddelde rekestijd met de standaardinstellingen het laagste is. Hoge rangeerkosten resulteert gemiddeld in een slechtere omloop ten opzichte van lage rangeerkosten en de standaardinstellingen omdat deze omlopen gemiddeld een hoger aantal bakkilometers, een hoger aantal kilometers over de norm en een hoger aantal rangeeractiviteiten hebben. Een tabel met alle resultaten is te vinden in Appendix F in Tabel 28.

Tabel 14 Resultaten scenario 2 gegroepeerd naar rangeerkosten

Rangeerkosten	Gemiddeld aantal bakkilometers	Gemiddeld aantal kilometers over de norm	Gemiddeld aantal rangeer- activiteiten	Gemiddeld percentage flexibele keringen	Gemiddelde rekestijd in seconden
Laag	142319	983	140	23,4%	0,95
Standaard	143021	983	136	24,0%	0,75
Hoog	144243	1256	136	26,0%	1,36

Omdat de rangeerkosten in de eerste twee scenario's weinig invloed hebben op het flexibel keren, worden de volgende scenario's alleen nog getest met de standaard instellingen.

5.4 Scenario 3: Alle ICM-treinstellen

In dit scenario worden de 122 ICM-treinstellen gepland op de treinen die in het referentieplan ook met ICM-treinstellen gereden werden. Er zijn 25 treinseries waarvan één of meer treinnummers met ICM gepland wordt. Ook voor dit scenario worden nieuwe materieelomlopen gemaakt met een aantal verschillende instellingen. Deze instellingen staan in Tabel 15.

Tabel 15 Geteste instellingen voor scenario 3

Onderdeel	Geteste instellingen
Rangeerkosten	Standaard instellingen
Flexibele stations	Geen, twee sporen in Den Haag Centraal, twee sporen in Den Haag Centraal en twee sporen in Enschede
Kosten voor de pool	<i>Wel</i> en <i>geen</i> kosten voor de pool

De volledige resultaten staan in Tabel 30 in Appendix F. In Tabel 16 staan de resultaten gegroepeerd naar flexibel keren, zodat de uitkomsten voor deze instellingen vergeleken kunnen worden. Volgens verwachting geldt hier dat de gemiddelde rekestijd hoger is naarmate flexibel keren op meer stations mogelijk is. Het mogelijk maken van flexibel keren in Enschede zorgde voor een hogere rekestijd, maar op dit station zijn geen flexibele keringen gemaakt. Daarnaast blijkt uit Tabel 30 dat er evenveel bakkilometers en kilometers over de norm zijn bij de plannen waar flexibel keren mogelijk is en er kosten zijn voor het gebruik ervan.

Tabel 16 Resultaten scenario 3

Flexibel keren	Gemiddeld aantal bakkilometers	Gemiddeld aantal kilometers over de norm	Gemiddeld aantal rangeeractiviteiten	Gemiddeld percentage flexibele keringen	Gemiddelde rekestijd (sec)
Niet	382725	10346	300	-	15,72
Den Haag Centraal	389408	17010	349	13,0%	473,51
Den Haag Centraal en Enschede	389524	17010	348	5,8%	513,67

In Tabel 17 staan de wijzigingen aan het referentieplan. Net als bij scenario 2 geldt dat de plannen met flexibel keren minder ritten boven de norm, minder geraakte rangeeractiviteiten, minder ritten met minder capaciteit en minder ritten met meer capaciteit hebben dan het plan zonder flexibel keren. Het aantal ritten met meer capaciteit is bij de plannen met flexibel keren naar verhouding wel hoger dan bij materieelomlopen zonder flexibel keren.

Tabel 17 Wijzigingen t.o.v. het referentieplan in scenario 3

Flexibel keren	Aantal ritten boven de norm	Gemiddeld aantal geraakte rangeeractiviteiten	Gemiddeld aantal ritten met minder capaciteit	Gemiddeld aantal ritten met meer capaciteit
Niet	51	153	238	177
Den Haag Centraal	35	56	88	72
Den Haag Centraal en Enschede	35	55	87	73

5.5 Scenario 4: De NoordOost

In sectie 2.2.1 is de NoordOost toegelicht. Kort gezegd vallen de treinseries hieronder die een verbinding vormen tussen de Randstad (Den Haag Centraal, Rotterdam Centraal en Schiphol) met het Noorden (Groningen, Leeuwarden) en Oosten (Enschede) van het land. In dit scenario worden nieuwe materieelomlopen gemaakt voor deze tien treinseries. Deze treinseries worden gepland met 88 stellen ICM en 29 stellen VIRM. Het maken van een materieelplanning is complexer dan wanneer er slechts één materieelsoort gepland wordt.

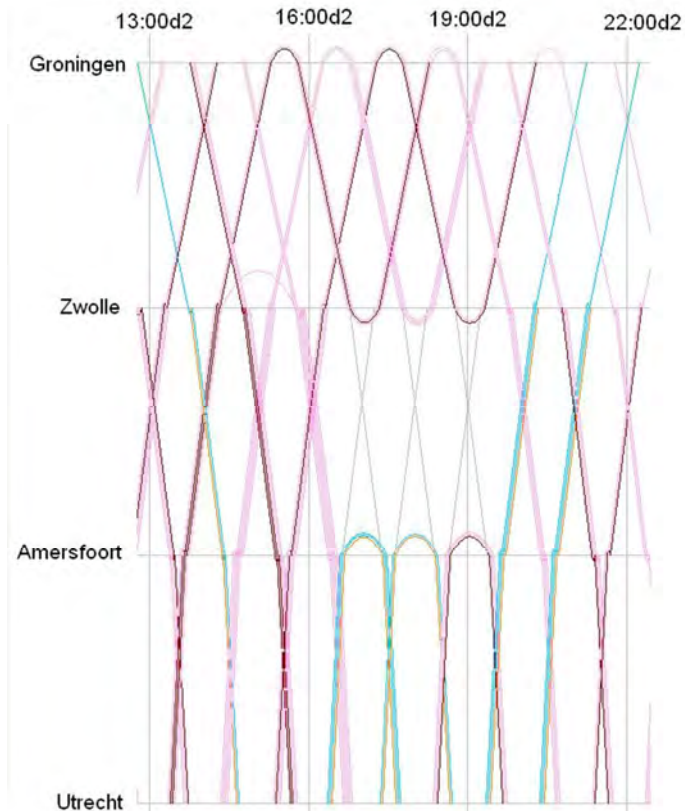
Tabel 18 Geteste instellingen voor scenario 4

Onderdeel	Geteste instellingen
Rangeerkosten	Standaard instellingen
Flexibele stations	Geen, twee sporen in Schiphol en twee sporen in Enschede, twee sporen in Den Haag Centraal en twee sporen in Groningen
Kosten voor de pool	<i>Wel</i> en <i>geen</i> kosten voor de pool

De tabel met alle resultaten staat in Appendix F in Tabel 32. Alle omlopen waarbij gebruik kan worden gemaakt van flexibel keren geven een plan met meer bakkilometers, meer kilometers over de norm en meer rangeeractiviteiten. Daarnaast is de rekestijd voor al deze plannen minimaal zes keer langer dan bij een plan waarbij flexibel keren niet mogelijk is. Opvallend is dat de rekestijd voor een omloop met twee stations waar flexibel keren mogelijk is, sterk kan verschillen afhankelijk van de gekozen stations. Wanneer er geen kosten zijn voor het gebruik van de pool, duurt het 747,23 seconden om een materieelplan uit te rekenen met flexibel keren in Schiphol en Enschede. Dezelfde instellingen maar mogelijkheid tot flexibel keren in Den Haag Centraal en Groningen geeft een rekestijd van 1264,44 seconden, dit is een stijging van bijna 70%. Evenals de eerste drie scenario's, hebben de plannen waarbij flexibel keren mogelijk is, minder wijzigingen aan het referentieplan. Dit is terug te vinden in Appendix F in Tabel 33.

5.6 Scenario 5: De NoordOost met een verstoring

In de eerste vier scenario's is flexibel keren gebruikt bij het plannen van een materieelomloop langere tijd van tevoren, waarbij er geen werkzaamheden of verstoringen bekend zijn. In het vijfde scenario wordt er gekeken hoe flexibel keren gebruikt kan worden in de bijsturing. In het geval van een verstoring moeten er in de bijsturing nieuwe keringen worden aangelegd omdat de geplande materieelomloop niet meer uit te voeren is. In dit geval is er een verstoring tussen Amersfoort en Zwolle waardoor treinen die tussen 16:00 uur en 19:00 uur bij Amersfoort aankomen en door moeten naar Zwolle of in Zwolle aankomen en door moeten naar Amersfoort niet verder kunnen rijden.



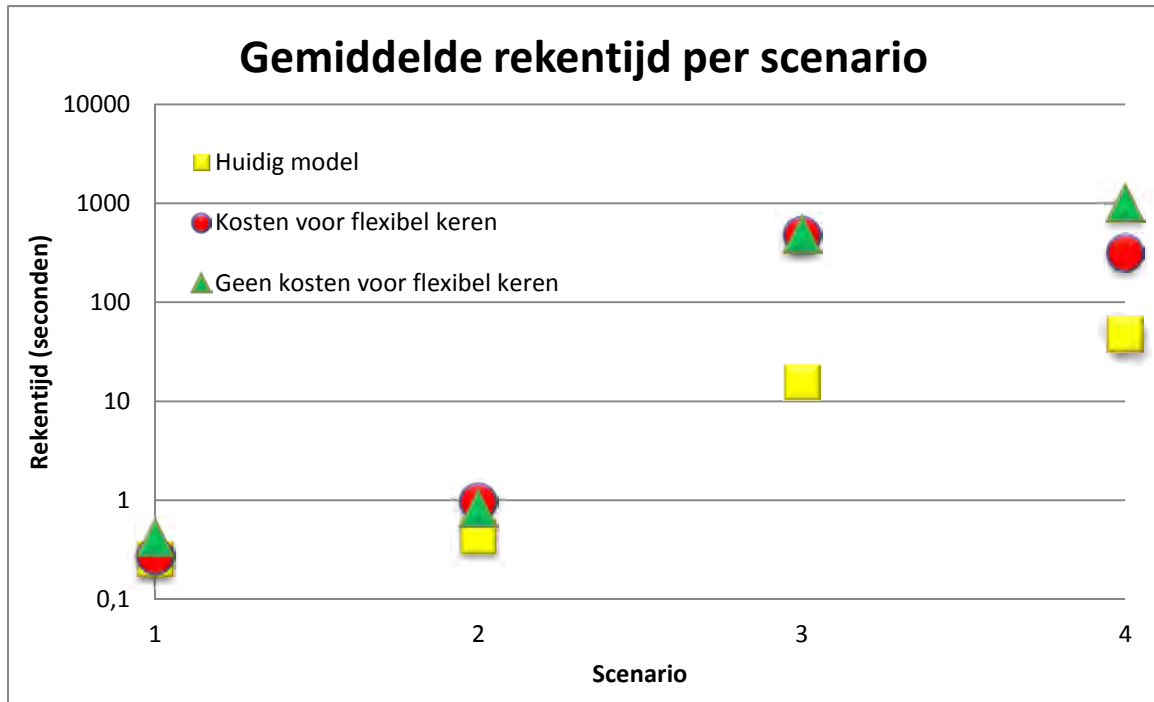
Figuur 21 Tijd-weg diagram met een versperring tussen Amersfoort en Zwolle van 16.00uur tot 19.00uur

Dit is ook te zien in Figuur 21. In dit tijd-weg diagram van een geplande materieelomloop geven de gekleurde lijnen aan dat er materieel is gepland op de betreffende rit. Tussen 16:00 uur en 19:00 uur is er geen materieel gepland tussen Amersfoort en Zwolle omdat er dan niets kan rijden. De keringen zijn al vastgelegd, dit is te zien aan de halve cirkels aan het einde van de gekleurde lijnen. In dit scenario kan het model flexibel keren in Amersfoort en Zwolle vanaf 16:00 uur. Voor die tijd is het niet mogelijk om iets aan het referentieplan te wijzigen. Op het moment dat de verstoring bekend is, kan je namelijk niet het materieelplan eerder op de dag aanpassen.

Uit de resultaten in Appendix F in Tabel 34 is af te leiden dat het gebruik van flexibele keringen leidt tot een hoger aantal bakkilometers, maar een verlaging van het aantal kilometers over de norm. Dit aantal kilometers over de norm is overigens hoger dan in de andere scenario's. Dit komt omdat er niet gecorrigeerd is voor treinen die uitvallen. Volgens het model rijdt er in dat geval een trein met capaciteit 0 terwijl er wel reizigersprognoses zijn. Alle voorspelde reizigers reizen in dat geval over de norm. Opvallend is de stijging in rekestijd, waar het model zonder flexibel keren er 0,75 seconden over doet om een nieuw plan te maken, is de rekestijd van een planning met en zonder kosten voor het gebruik van de pool respectievelijk 45,78 seconden en 111,06 seconden. De materieelomlopen die de mogelijkheid hebben om flexibel te keren scoren beter wat betreft wijzigingen ten opzichte van het referentieplan. Dit blijkt uit Tabel 35 uit Appendix F.

5.7 Vergelijking rekentijd met complexiteit

In deze paragraaf worden de eerste vier geteste scenario's vergeleken op rekentijd. Het vijfde scenario, het berekenen van een nieuwe materieelomloop in geval van verstoring, wordt hier niet vergeleken. Dat is namelijk een ander soort probleem. De resultaten van het vijfde scenario zijn om deze reden niet te vergelijken met de resultaten van de eerste vier scenario's. De scenario's zijn oplopend in complexiteit, dit is terug te zien aan de gemiddelde rekentijd. In Figuur 22 is de gemiddelde rekentijd per scenario te zien, uitgesplitst naar het huidige model en naar de mogelijkheid van flexibel keren *met* en *zonder* kosten voor het gebruik van flexibele keringen. De gegevens hiervan staan in



Figuur 22 Plot van de gemiddelde rekentijd per scenario

De rekentijd is uitgezet op een logaritmische schaal, omdat de rekentijd exponentieel toeneemt wanneer het probleem complexer wordt. Op deze manier is voor elk scenario het verschil tussen het huidige model en het model met de uitbreiding naar flexibele keringen te zien. De rekentijd voor materieelomlopen waar flexibel keren mogelijk is, neemt ook exponentieel toe. Omdat het probleem met flexibel keren altijd groter is dan het probleem waarbij de mogelijkheid tot flexibel keren er niet is, ligt de rekentijd van de laatste standaard lager. Wanneer er kosten worden gerekend voor het gebruik van flexibel keren, ligt de rekentijd in het eerste en vierde scenario lager dan wanneer er geen kosten zijn voor het gebruik van de pool. In het tweede en derde scenario is de rekentijd voor beiden ongeveer even hoog.

6. Conclusies en aanbevelingen

In dit rapport is de probleemstelling 'Hoe kan TAM flexibele keringen maken en wat levert dit op?' onderzocht. Dit gebeurde aan de hand van vier deelvragen:

1. Wat is de wiskundige methode achter TAM?
2. Welke wiskundige methode gebruikt Nielsen om TAM keringen te laten maken?
3. Wat is de invloed van flexibel keren op het materieelplan?
4. Hoe kan deze methode worden uitgebreid van keringen naar keerpatronen?

De eerste twee deelvragen zijn behandeld in hoofdstuk 3, de vierde deelvraag is besproken in hoofdstuk 4. In dit hoofdstuk zal de derde deelvraag behandeld worden aan de hand van de resultaten zoals gegeven in hoofdstuk 5. Hierbij zal het gebruik van flexibel keren bij de planning, bij studies en in de bijsturing besproken worden.

6.1 Flexibel keren in de planning

In Tabel 19 worden de materieelomlopen *zonder* en *met* mogelijkheid tot flexibel keren per scenario vergeleken op welk plan minder bakkilometers, minder kilometers over de norm en/of minder wijzigingen ten opzichte van het referentieplan heeft. Hoewel materieelomlopen waarbij flexibel keren *niet* mogelijk is bij alle scenario's minder bakkilometers hebben, hebben deze wel meer wijzigingen ten opzichte van het referentieplan en, zoals bleek uit de resultaten, ook meer ritten over de normering.

Tabel 19 Vergelijking van de plannen *met* en *zonder* flexibele keringen voor alle scenario's

Scenario	Omlopen zonder flexibel keren	Omlopen met flexibel keren
1	Minder bakkilometers	Minder kilometers over de norm, minder wijzigingen t.o.v. het referentieplan
2	Minder bakkilometers, minder kilometers over de norm bij lage rangeerkosten en de standaardinstellingen	Minder kilometers over de norm bij hoge rangeerkosten, minder wijzigingen t.o.v. het referentieplan
3	Minder bakkilometers, minder kilometers over de norm	Minder wijzigingen t.o.v. het referentieplan
4	Minder bakkilometers, minder kilometers over de norm	Minder wijzigingen t.o.v. het referentieplan
5	Minder bakkilometers	Minder kilometers over de norm, minder wijzigingen t.o.v. het referentieplan

In sectie 2.4 is toegelicht dat het op de planningsafdeling vaak wenselijk is om dicht bij het referentieplan te blijven wanneer er bijvoorbeeld vanwege werkzaamheden een andere materieelomloop moet komen. Flexibel keren geeft dan betere resultaten. Dus wanneer een nieuwe materieelomloop zo dicht mogelijk bij het referentieplan moet blijven, is flexibel keren goed te gebruiken. Wanneer wijzigingen ten opzichte van het referentieplan niet erg zijn, kan er beter gepland worden zonder flexibel keren. Dit resulteert in materieelomlopen met minder bakkilometers en geregeld minder kilometers over de norm.

6.2 Gebruik bij studies

In dit rapport is onderzoek gedaan naar een beperkt aantal stations en treinseries om het gebruik van flexibele keringen te testen. Dit biedt ruimte voor de Nederlandse Spoorwegen om flexibel keren op andere stations te onderzoeken. De langere rekentijd en de vele mogelijkheden om te onderzoeken zijn dan geen bezwaar. Aangezien nieuwe keringen voor langere tijd in de materieelplanning vastliggen, hoeft het onderzoek hiernaar slechts eenmaal te gebeuren. Alleen bij grote veranderingen in de dienstregeling, wanneer er bijvoorbeeld nieuwe treinseries worden ingevoerd, is het nodig er opnieuw naar te kijken. Het mogelijk maken van het sturen op *keerpatronen* is hierbij een goede aanvulling. De planningsafdeling kan vervolgens de resultaten van dit onderzoek gebruiken en de gevonden verbeterde keringen of keerpatronen vastleggen. Verbeterde keringen hebben een positieve invloed op de materieelplanning omdat er alleen voor een flexibele kering wordt gekozen als dit een verbetering oplevert. Er kan immers ook voor worden gekozen om de originele kering in stand te houden.

6.3 Bijsturing

Het gebruik van flexibele keringen in het geval van een verstoring heeft voordelen boven vaste keringen. De materieelomloop kan dan worden aangepast om treinen te versterken op trajecten waar extra reizigers zijn in verband met omreizen. Daarnaast worden er nieuwe keringen gemaakt voor het materieel dat bij het versperde traject komt en niet verder kan. Flexibel keren heeft dan een positieve invloed op het materieelplan. Het is echter nog niet mogelijk om TAM te gebruiken in de bijsturing. Zolang dit niet kan, is het natuurlijk ook niet mogelijk om flexibel keren toe te passen. Wanneer TAM wel gebruikt wordt in de bijsturing, is flexibel keren een goede aanvulling. In de bijsturing is het van belang dat er snel een nieuw plan gemaakt wordt. De maximale rekentijd bij de verstoring tussen Amersfoort en Zwolle in scenario 5 van 111 seconden vormt daarin geen belemmering omdat er binnen twee minuten een nieuw materieelplan is.

7. Literatuurlijst

- [1] Nielsen (2011). *Rolling Stock Rescheduling in Passenger Railways*
- [2] Pijpers, A. Website met tekeningen van materieel: www.arthurstreinenpagina.nl. Geraadpleegd op 4 januari 2012.

Bijlagen

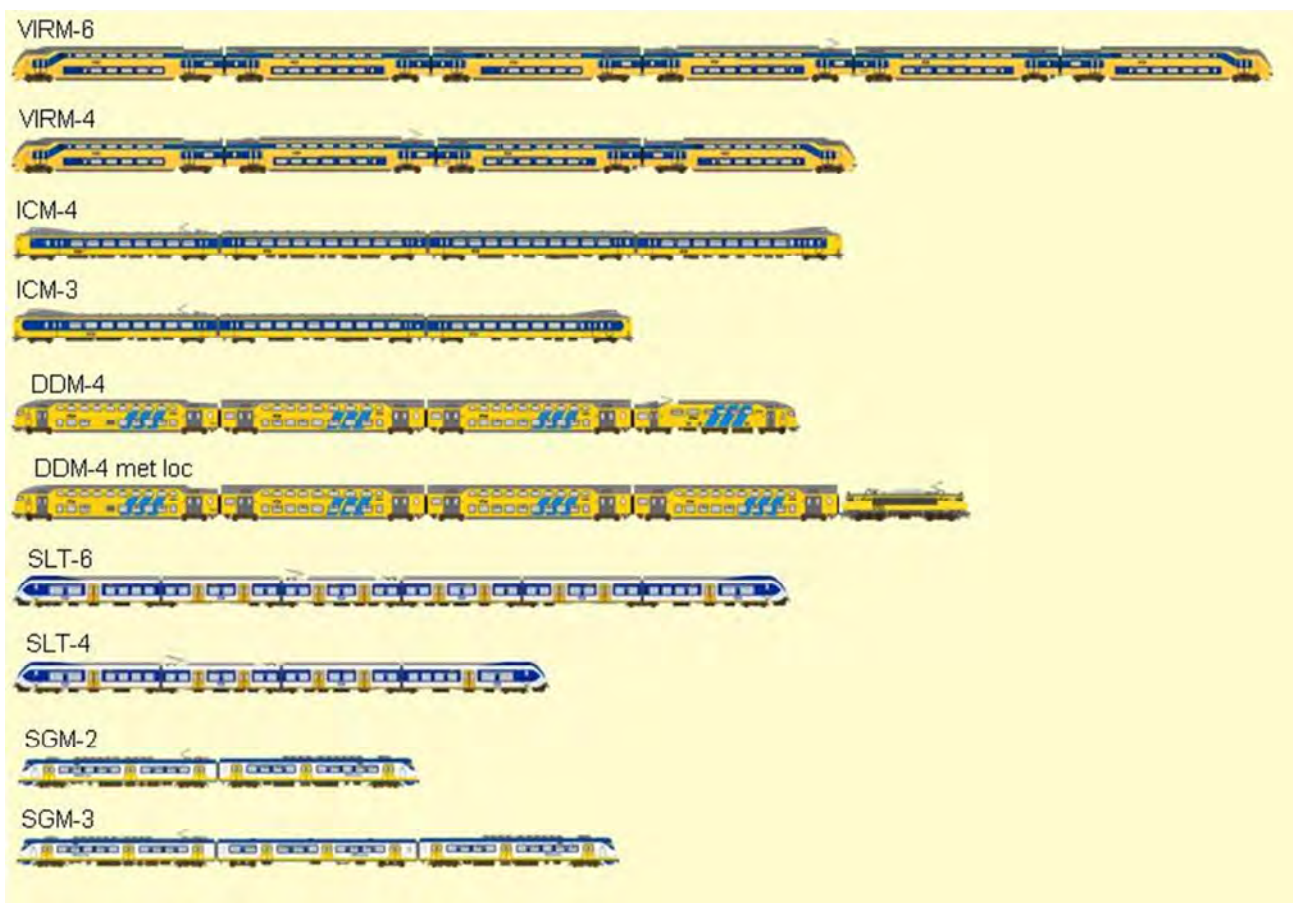
Appendix A – Begrippenlijst

Tabel 20 Betekenis van de begrippen

Begrip	Betekenis
Aftrappen	Het weghalen van één of meer treinstellen van een trein
Bak	Een treinrijtuig of treinwagon
Bijplaatsen	Het toevoegen van één of meer treinstellen aan een trein
Bijsturen	Het aanpassen van het bestaande (materieel)plan omdat deze niet langer uitvoerbaar is, bijvoorbeeld door een verstoring, op de dag zelf
Combineren	Kering waarbij het materieel van twee voorgaande treinen naar één opvolgende trein gaat
Compositie (van een trein)	De gekoppelde treinstellen waarmee een trein rijdt, hetzelfde als 'samenstelling'
Compositie-overgang	Geeft aan wat de compositie is/wat de composities zijn van de nul, één of twee voorgaande treinen en de nul, één of twee opvolgende treinen
Dienst	Geeft van een treinstel aan voor de hele dag met welke treinnummers op welke positie het moet rijden
Eindiger	Materieelovergang waarbij er geen opvolgende trein is, het materieel gaat naar de voorraad van het station
Kering	Geeft aan waar het materieel van een of meer eindigende treinen heengaat, of waar het materieel van een startende trein vandaan komt. Hetzelfde als 'kering'
Materieel-overgang	Geeft aan waar het materieel van een of meer eindigende treinen heengaat, of waar het materieel van een startende trein vandaan komt. Hetzelfde als 'kering'
Materieel-omloop	Verdeling van het materieel over alle te rijden treinen. Geeft dus voor alle treinen een dienst en daarmee is bekend wat de samenstelling is van alle treinen
Materieelplan	Verdeling van het materieel over alle te rijden treinen. Geeft dus voor alle treinen een dienst en daarmee is bekend wat de samenstelling is van alle treinen
Materieelsoort	Het soort materieel waarmee gereden wordt. Voor een plaatje van meest voorkomende materieelsoorten, zie Appendix B
Opvolger	Treinnummer waarop het materieel na een kering heen gaat
Rit	Stuk tussen twee stations waarbij de trein niet van samenstelling mag veranderen.
Samenstelling (van een trein)	De gekoppelde treinstellen waarmee een trein rijdt, hetzelfde als 'compositie'
Splitsen	Kering waarbij het materieel van een voorgaande trein naar twee opvolgende treinen gaat
Starter	Materieelovergang waarbij er geen voorgaande trein is, oftewel het materieel komt uit de voorraad van het station

Taak	Onderdeel van een dienst van een treinstel, dit geeft bij j een bepaalde rit de positie aan waar het stel moet rijden
TAM	Programma waarmee een materieelomloop gemaakt wordt
Treinnummer	Dit geeft aan bij welke treinserie de trein hoort en op welk moment van de dag hij rijdt
Treinserie	Dit geeft de route aan die alle treinen van deze treinserie volgen
Verzameling van composities	Flexibele keringen kunnen worden gemaakt door gebruik te maken van een verzameling van composities op een station: eindigende treinen sturen er dan een compositie heen, startende treinen halen er een compositie uit
Voorganger	Treinnummer waar het materieel voor een kering vandaan komt

Appendix B - Materieelsoorten [2]



Figuur 23 Plaatjes van materieelsoorten

Appendix C – Gebruikte afkortingen

Tabel 21 Betekenis van gebruikte afkortingen

Afkorting	Betekenis
DDM	Dubbeldeks materieel (materieelsoort)
ICM	Intercitymaterieel (materieelsoort)
NS	Nederlandse Spoorwegen
PI	Proceskwaliteit & Innovatie (afdeling bij de NS)
SGM	Stadsgewestelijk Materieel (materieelsoort)
SLT	Sprinter Lightrain (materieelsoort)
TAM	Tool voor Aanpassing van de Materieelinzet
VIRM	Verlengd Interregiomaterieel (materieelsoort)

Appendix D – Gebruikte notaties in het model

Tabel 22 Notatie van begrippen in het model

Begrip	Notatie
Aantal afgetrapte stellen van materieeltype m op compositieovergang q	$\alpha_{q,m}$
Gewenste beginvoorraad op station s van materieeltype m	$i_{s,m}^0$
Aantal bijgeplaatste stellen van materieeltype m op compositieovergang q	$\beta_{q,m}$
Compositie	p
Toegestane composities op rit t	$\eta(t)$
Compositieovergang	q
Toegestane compositieovergangen op kering c	$\rho(c)$
Gewenste eindvoorraad op station s van materieeltype m	$i_{s,m}^\infty$
Materieeltype	m
Set toegestane materieeltypes	M
Opvolger	$\sigma(t)$
Rit	t
Set van toegestane ritten	T
Station	s
Set toegestane stations	S
Voorganger van rit t	$\pi(t)$

Appendix E – Instellingen van de doelfunctie van het model

Tabel 23 Vaste kosten in de doelfunctie

Parameter	Kosten
Bakkilometers	0,1
Kosten per kilometer per reiziger over de norm	0,5
Kosten per keer rangeren	10
Kosten per onbezette zitplaats per kilometer	0,001
Kosten per treinstel dat op een andere plek begint dan in het referentieplan	500
Kosten per treinstel dat op een andere plek eindigt dan in het referentieplan	500
Kosten per gebruikt stel	0
Kosten per rit per veranderde samenstelling	
Kosten per rit per verkleinde samenstelling	1
Kosten per rit per vergrote samenstelling	0
Meer conducteurs nodig wegens veranderende samenstelling	10
Ander materieelsoort	0
Cancel van een reizigerstrein	1000000

Dit zijn de instellingen die voor elke berekende omloop gelijk zijn. Opvallend is dat de kosten voor cancel van een reizigerstrein ontzettend hoog zijn: 1000000. Dit geeft aan dat het alleen in uitzonderlijke situaties is toegestaan om geen materieel te plannen op een rit, oftewel, om een rit niet te rijden. Daarnaast zijn ook de kosten voor elk treinstel dat op een andere plek begint dan in het referentieplan hoog. Als een treinstel in de berekende omloop op een andere plek begint dan hij in werkelijkheid staat, moet het stel nog verplaatst worden. Dit levert extra kosten op en er moet een extra rit worden ingelegd. Wanneer het treinstel op een andere plek eindigt, is het om dezelfde reden niet wenselijk. De hoogtes van de kosten zijn de uitgangswaarden zoals deze in TAM gebruikt worden.

Tabel 24 Variabel gekozen parameters

Parameter	Kosten bij <i>Standaard instellingen</i>	Kosten bij <i>Hoge rangeerkosten</i>	Kosten bij <i>Lage rangeerkosten</i>
Nieuwe rangeeractiviteit	100	200	0
Veranderde rangeeractiviteit	50	100	0
Gecancelde rangeeractiviteit	1	0	100
Veranderd materieeltype bij het rangeren	1	100	0
Andere samenstelling van een starter	0	100	0
Andere samenstelling van een eindiger	0	100	0

Tabel 25 Parameters die bij flexibel keren horen

Parameter	Kosten bij <i>Geen kosten flexibel keren</i>	Kosten bij <i>Kosten flexibel keren</i>
Compositie naar de pool sturen	0	10
Compositie naar de pool sturen en rangeren	0	10
Compositie uit de pool nemen	0	10
Compositie uit de pool nemen en rangeren	0	10

Appendix F – Resultaten

Tabel 26 Resultaten scenario 1: Treinserie 3000

Rangeer- kosten	Instellingen			Resultaten							
	Aantal sporen op flexibele stations		Wel/geen kosten pool	Aantal bakkilometers	Aantal km over de norm	Aantal rangeer- activiteiten	Fractie flexibele keringen op station		Percentage flexibele keringen op station		Rekentijd (sec)
	Nijmegen	Den Helder					Nijmegen	Den Helder	Nijmegen	Den Helder	
Standaard	0	0	nvt	95934	652	74	-	-	-	-	0,26
Standaard	2	0	geen	101178	0	75	0/43	-	0,0%	-	0,44
Standaard	2	1	geen	98638	0	77	0/43	11/43	0,0%	25,6%	0,39
Standaard	2	0	wel	101178	0	72	0/43	-	0,0%	-	0,19
Standaard	2	1	wel	98638	0	77	0/43	17/43	0,0%	39,5%	0,36
Hoog	0	0	nvt	96890	324	74	-	-	-	-	0,39
Hoog	2	0	geen	101178	0	73	0/43	-	0,0%	-	0,25
Hoog	2	1	geen	99430	0	76	0/43	9/43	0,0%	20,9%	0,34
Hoog	2	0	wel	101178	0	72	0/43	-	0,0%	-	0,19
Hoog	2	1	wel	99430	0	76	0/43	15/43	0,0%	34,9%	0,33
Laag	0	0	nvt	95416	324	81	-	-	-	-	0,41
Laag	2	0	geen	99866	0	81	0/43	-	0,0%	-	0,22
Laag	2	1	geen	97982	0	81	0/43	6/43	0,0%	14,00%	0,44
Laag	2	0	wel	99866	0	80	0/43	-	0,0%	-	0,19
Laag	2	1	wel	97190	168	80	0/43	10/43	0,0%	23,26%	0,44

Tabel 27 Wijzigingen scenario 1 t.o.v. het referentieplan

Rangeer- kosten	Instellingen			Wijzigingen						
	Aantal sporen op flexibele stations	Den Helder	Wel/geen kosten pool	Gemiddeld aantal ritten boven de norm	Aantal opgeheven rangeer- activiteiten	Aantal nieuwe rangeer- activiteiten	Aantal veranderde rangeer- activiteiten	Aantal ritten met minder capaciteit	Aantal ritten met meer capaciteit	Aantal ritten extra conductor nodig
Standaard	0	0	nvt	8	4	1	10	19	36	11
Standaard	2	0	geen	3	6	1	4	3	46	24
Standaard	2	1	geen	2	2	1	3	8	39	16
Standaard	2	0	wel	3	6	1	4	3	46	24
Standaard	2	1	wel	2	3	1	3	8	39	16
Hoog	0	0	nvt	6	4	1	4	3	22	11
Hoog	2	0	geen	3	2	1	4	3	46	24
Hoog	2	1	geen	2	1	0	4	8	47	16
Hoog	2	0	wel	3	6	1	4	3	46	24
Hoog	2	1	wel	2	3	0	4	8	47	16
Laag	0	0	nvt	7	1	5	16	25	29	10
Laag	2	0	geen	3	0	6	6	5	37	18
Laag	2	1	geen	2	0	4	3	9	35	12
Laag	2	0	wel	3	0	6	7	5	37	18
Laag	2	1	wel	3	0	4	5	7	31	12

Tabel 28 Resultaten scenario 2: Treinseries 3000 en 3100

Instellingen			Resultaten						
Rangeerkosten	Aantal sporen op flexibel station Nijmegen	Wel/geen kosten pool	Aantal bakkilometers	Aantal km over de norm	Aantal rangeer-activiteiten	Fractie flexibele keringen	Percentage flexibele keringen	Rekentijd (sec)	
Standaard	0	nvt	139042	652	131	-	-	0,44	
Standaard	2	geen	145406	1148	139	20/77	26,0%	0,83	
Standaard	2	wel	144614	1148	139	17/77	22,1%	0,98	
Hoge rangeerkosten	0	nvt	141918	1472	131	nvt	-	0,45	
Hoge rangeerkosten	2	geen	145406	1148	140	21/77	27,3%	1,34	
Hoge rangeerkosten	2	wel	145406	1148	138	19/77	24,7%	2,28	
Lage rangeerkosten	0	nvt	138714	652	135	nvt	-	0,32	
Lage rangeerkosten	2	geen	144122	1148	143	19/77	24,7%	1,22	
Lage rangeerkosten	2	wel	144122	1148	143	17/77	22,1%	1,31	

Tabel 29 Wijzigingen t.o.v. referentieplan voor scenario 2

Rangeerkosten	Instellingen		Wijzigingen						
	Aantal flexibele sporen op station Nijmegen	Wel/geen kosten pool	Aantal ritten boven de norm	Aantal opgeheven rangeer-activiteiten	Aantal nieuwe rangeer-activiteiten	Aantal veranderde rangeer-activiteiten	Aantal ritten met minder capaciteit	Aantal ritten met meer capaciteit	Aantal ritten extra conducteur nodig
Standaard	0	nvt	8	4	2	33	58	74	25
Standaard	2	geen	4	1	1	8	4	59	28
Standaard	2	wel	4	2	1	9	7	51	28
Hoge rangeerkosten	0	nvt	7	4	2	9	3	45	25
Hoge rangeerkosten	2	geen	4	2	1	8	4	59	28
Hoge rangeerkosten	2	wel	4	2	1	8	4	59	28
Lage rangeerkosten	0	nvt	8	3	5	35	64	73	23
Lage rangeerkosten	2	geen	4	1	3	9	9	49	26
Lage rangeerkosten	2	wel	4	1	6	9	9	49	26

Tabel 30 Resultaten scenario 3: Al het ICM materieel

Instellingen				Resultaten							
Flexibele stations en aantal sporen				Fractie flexibele keringen				Percentage flexibele keringen			
Rangeerkosten	Den Haag Centraal	Enschede	Wel/geen kosten pool	Aantal bak-kilometers	Aantal km over de norm	Aantal rangeer-activiteiten	Den Haag Centraal	Enschede	Den Haag Centraal	Enschede	Rekentijd (sec)
Standaard	0	0	-	382725	10346	300	-	-	-	-	15,72
Standaard	2	0	geen	389292	17010	348	11/77	0/42	14,3%	-	491,78
Standaard	2	0	wel	389524	17010	349	9/77	-	11,7%	-	455,23
Standaard	2	2	wel	389524	17010	348	9/77	0/42	11,7%	0%	513,67

Tabel 31 Wijzigingen scenario 3 t.o.v. het referentieplan

Instellingen				Wijzigingen						
Flexibele stations en aantal sporen				Aantal ritten boven de norm	Aantal opgeheven rangeer-activiteiten	Aantal nieuwe rangeer-activiteiten	Aantal veranderde rangeer-activiteiten	Aantal ritten met minder capaciteit	Aantal ritten met meer capaciteit	Aantal ritten extra conducteur nodig
Rangeerkosten	Den Haag Centraal	Enschede	Wel/geen kosten pool							
Standaard	0	0	-	51	39	8	106	238	177	57
Standaard	2	0	geen	35	18	13	25	90	72	25
Standaard	2	0	wel	35	18	13	25	86	72	25
Standaard	2	2	wel	35	19	12	24	87	73	26

Tabel 32 Resultaten scenario 4: De NoordOost

Instellingen			Resultaten								
Rangeerkosten	Flexibele stations en aantal sporen		Wel/geen kosten pool	Aantal bak-kilometers	Aantal km over de norm	Aantal rangeer-activiteiten	Fractie keringen Schiphol	flexibele		Rekentijd (sec)	
	Schiphol	Enschede						Schiphol	Enschede		
Standaard	0	0	nvt	351371	11972	297	-	-	-	47,39	
Standaard	2	2	geen	364439	16085	306	4/13	16/37	30,8%	747,23	
Standaard	2	2	wel	365119	15944	304	0/39	3/37	0,0%	317,74	
	Den Haag Centraal	Groningen					Den Haag Centraal	Groningen	Den Haag Centraal	Groningen	1264,4
Standaard	2	2	geen	360534	16000	311	4/75	7/48	5,3%	14,6%	4

Tabel 33 Wijzigingen scenario 4 t.o.v. het referentieplan

Instellingen			Wijzigingen						
Flexibele stations en aantal sporen		Wel/geen kosten pool	Aantal ritten boven de norm	Aantal opgeheven rangeer-activiteiten	Aantal nieuwe rangeer-activiteiten	Aantal veranderde rangeer-activiteiten	Aantal ritten met minder capaciteit	Aantal ritten met meer capaciteit	Aantal ritten extra conducteur nodig
Schiphol	Enschede								
0	0	nvt	28	27	11	125	237	114	84
2	2	geen	21	20	9	21	65	53	28
2	2	wel	21	20	10	20	58	51	25
Den Haag Centraal	Groningen								
2	2	geen	22	15	4	14	89	38	23

Tabel 34 Resultaten scenario 5: NoordOost met verstoring tussen Amersfoort en Zwolle

Rangeerkosten	Instellingen			Resultaten							
	Flexibele stations en sporen		Wel/geen kosten pool	Aantal bak-kilometers	Aantal km over de norm	Aantal rangeer-activiteiten	Fractie keringen ²	flexibele keringen	Percentage keringen	flexibele keringen	Rekentijd (sec)
	Amersfoort	Zwolle					Amersfoort	Zwolle	Amersfoort	Zwolle	
Standaard	0	0	-	345087	46061	313	-	-	-	-	0,75
Standaard	4	4	geen	350123	36356	323	15/83	3/41	18,1%	7,3%	111,06
Standaard	4	4	wel	352297	36644	322	8/83	3/41	9,6%	7,3%	45,78

Tabel 35 Wijzingen scenario 5 t.o.v. het referentieplan

Instellingen			Wijzingen						
Flexibele stations en aantal sporen		Wel/geen kosten pool	Aantal ritten boven de norm	Aantal opgeheven rangeer-activiteiten	Aantal nieuwe rangeer-activiteiten	Aantal veranderde rangeer-activiteiten	Aantal ritten met minder capaciteit	Aantal ritten met meer capaciteit	Aantal ritten extra conducteur nodig
Amersfoort	Zwolle								
0	0	-	35	17	5	57	122	57	13
4	4	geen	28	12	10	34	79	75	25
4	4	wel	29	14	11	32	69	66	23

² Deze fractie is genomen op het aantal keringen dat aangepast had kunnen worden: dus het aantal flexibele keringen op het totaal aantal keringen na 16.00 uur.

Appendix G – Vergelijking van de rekestijd per scenario

Tabel 36 Gemiddelde rekestijd per scenario in seconden

Scenario	Huidig model	Flexibele keringen	
		Geen kosten voor flexibel keren	Kosten voor flexibel keren
1	0,26	0,415	0,275
2	0,44	0,83	0,98
3	15,72	491,78	484,45
4	47,39	1005,835	317,74