Dienstregeling bij infrastoringen

Auteur: Wieger Maris

Studentnummer: 323312

Instelling: Erasmus Universiteit Rotterdam

Afstudeerbegeleider: Dr. D. Huisman

Abstract

Spoorwegmaatschappijen hebben jaarlijks meerdere malen te maken met grote storingen waardoor er gedurende een lange tijd geen treinverkeer mogelijk is van en naar een belangrijk knooppunt. Zodra het technisch mogelijk is om de treinen weer te laten rijden, kan het zo zijn dat het aantal gestrande reizigers groter is dan de reguliere dienstregeling aan zou kunnen. Daarom is een tijdelijke acyclische alternatieve dienstregeling noodzakelijk. In deze scriptie worden twee modellen gepresenteerd en met elkaar vergeleken. Beide modellen hebben als doel de totale wacht- en reistijd van de gestrande passagiers te minimaliseren. Voor implementatiedoeleinden zullen de modellen daarnaast in een korte tijd tot een goede oplossing moeten komen.

Inhoudsopgave

1. Introductie

1.1 Probleem introductie

Elke dag maken in Nederland meer dan een miljoen mensen gebruik van vervoer voor werk- of privédoeleinden. Een van de meest gebruikte vormen van interregionaal personenvervoer in Nederland is treinvervoer. In 2011 werd er in totaal door de passagiers van de Nederlandse Spoorwegen (NS), veruit de grootste gebruiker van het Nederlandse spoornet, 16.8 miljard kilometer gereisd[1]. De NS heeft als missie *telkens meer reizigers, veilig, op tijd en comfortabel te vervoeren via aantrekkelijke stations*.[2]

Probleem NS

Helaas is het niet mogelijk voor de NS om haar treinen altijd op tijd te laten vertrekken of te laten arriveren. Dit kan voorkomen door externe factoren zoals extreme weersomstandigheden, stroomstoringen en terroristische acties. Rekening houdend met de missie die de NS hanteert, is het echter vaak noodzakelijk om allereerst het probleem op te (laten) lossen om vervolgens de passagiers weer zo snel en comfortabel mogelijk naar hun bestemming te vervoeren.

Eigen Oplossingen

Door samen te werken met spoorbeheerder ProRail en de rijksoverheid, probeert de NS vertragingen te voorkomen en, zodra ze voorkomen, zo zorgvuldig mogelijk op te lossen. Daarnaast maakt de NS zelf gebruik van Operations Research technieken om de passagiers na eventueel oponthoud weer naar plaats van bestemming te vervoeren. Er zijn echter altijd nieuwe ideeën en methodes die voor betere oplossingen kunnen zorgen.

1.2 Doel

In deze scriptie presenteren we twee verschillende modellen voor een alternatieve dienstregeling nadat een station gedurende een langere periode niet bereikbaar was. Het doel van deze modellen is om een acyclische dienstregeling op te stellen. Bij deze dienstregeling moeten we met het beschikbare materiaal en personeel de wacht- en reistijd van de gestrande reizigers zo klein mogelijk proberen te houden door ze zo snel mogelijk te vervoeren naar de omliggende stations. Na deze alternatieve dienstregeling kan de NS weer teruggaan naar de oorspronkelijke dienstregeling.

1.3 Overzicht

In het volgende hoofdstuk gaan we eerst het probleem duidelijk definiëren en kijken we waar een goede oplossing aan zou moeten voldoen. Vervolgens gaan we in hoofdstuk 3 kijken wat er in de huidige literatuur al bekend is over het precieze probleem of problemen

[1] Jaarverslag Nederlandse Spoorwegen 2011
[2] www.ns.nl/jaarverslag2011/campagnes/ns-in-2011/onze-strategie

die hier op lijken. In hoofdstuk 4 gaan we kijken naar de verschillende aannames die we maken voor de modellen en de informatie die bekend moet zijn om überhaupt een model te kunnen gebruiken. Hoofdstukken 5 en 6 behandelen vervolgens het *tweetrapsmodel*. Een heuristiek die het beschreven probleem met twee modellen oplost. Omdat we de resultaten van dit model uiteindelijk op waarde willen schatten, presenteren we in hoofdstuk 7 een uitgebreid model. Daarna behandelen we in hoofdstuk 8 drie scenario's waar we de modellen op toepassen en kijken we in hoofdstuk 9 naar de verschillen in de resultaten. In hoofdstuk 10 presenteren we onze conclusie en kijken we naar mogelijkheden voor vervolgonderzoek.

2. Probleemstelling

In dit hoofdstuk gaan we kijken naar het precieze probleem waar we een oplossing voor willen vinden en wat een goede oplossing zou kenmerken.

2.1 Situatieomschrijving

In deze scriptie richten we ons op de volgende situatie:

> *"Een treinstation is door een externe factor onbereikbaar gedurende een langere periode"*

Deze formulering bevat drie aspecten waarvan het belangrijk is om deze nauwkeurig te definiëren en te kijken wat voor gevolgen dit voor ons doel zal hebben.

> *Externe factor*: een omstandigheid die van buiten komt en invloed uitoefent[3]. Hierbij valt te denken aan vakbondsacties[4], stroomstoringen[5] en brand[6]. Allemaal omstandigheden waarvan de Nederlandse Spoorwegen bij aanvang van deze gebeurtenis niet of slecht kan voorspellen hoelang dit zal duren. Al deze omstandigheden zullen we nu definiëren als *verstoring*.
>
> *Onbereikbaar*: we hebben het over een onbereikbaar station als er geen treinverkeer mogelijk is van en naar dit station door treinen die een ander begin- of eindstation hebben dan het betreffende station. Vanaf nu wordt met *het station*, het station bedoeld dat gedurende een langere periode onbereikbaar is geweest.
>
> *Een langere periode*: we praten over een langere periode, wanneer het station dusdanig lang onbereikbaar is geweest dat voor meerdere bestemmingen het aantal wachtende passagiers groter is dan de capaciteit van de volgende trein die volgens de reguliere dienstregeling richting dat station zou vertrekken.

2.2 Doel

Het doel van deze scriptie is om een model te presenteren dat ervoor zorgt dat de passagiers die last ondervinden van de verstoring, zo snel mogelijk weer op plaats van bestemming komen door middel van een alternatieve dienstregeling. Hierin wordt elke passagier gelijkgesteld en is elk minuut even kostbaar. Daarom moet het model de totale wacht- en reistijd van alle passagiers samen, minimaliseren.

Omdat we voor en tijdens de verstoring nog geen goede schatting kunnen maken van de duur van de verstoring en daarbij ook het totaal aantal gedupeerde passagiers, kan het model pas worden gebruikt zodra we meer weten over de eindtijd van de verstoring. Tussen

[3] Combinatie van de betekenis van de woorden *extern* en *factor* volgens Van Dale Groot woordenboek
[4] Station Namen op 13 mei 2011
[5] Station Utrecht op 11 mei 2012
[6] Station Utrecht op 19 november 2010

dat moment en het moment waarop de treinen daadwerkelijk weer kunnen rijden, zit vaak weinig tijd. Daarom is het belangrijk dat het model in een redelijk korte tijd tot een goede oplossing komen.

3. Literatuuroverzicht

Voordat we onze modellen gaan presenteren, gaan we in dit hoofdstuk eerst kijken of er in de literatuur al informatie te vinden is over het probleem dat we in deze scriptie willen oplossen.

Jespersen-Groth e.a. (2009) geven een goed overzicht over het vakgebied dat zich bezighoudt met verstoringen op het spoor. In het artikel worden belangrijke definities uitvoerig besproken en komen de verschillende partijen aan bod die een rol van betekenis hebben bij het oplossen en voorkomen van verstoringen. Vooral belangrijk is de beschrijving van het proces van het oplossen van verstoringen. Hierbij wordt een duidelijk onderscheid gemaakt tussen het maken van een nieuwe dienstregeling, het inplannen van het materiaal en het veranderen van de werkschema's van de werknemers. In het artikel wordt duidelijk dat er in dit vakgebied nog veel op het gebied van Operational Research kan worden gedaan.

Carprara e.a. (2002) beschrijven in hun artikel een methode om een dienstregeling te maken tussen twee knooppunten. Ze gaan uit van een situatie waarin twee belangrijke stations met elkaar verbonden zijn door twee sporen. Het ene spoor vervoert treinen van plaats A naar B en het andere spoor vervoert treinen van plaats B naar A. De auteurs proberen een optimale periodieke dienstregeling voor dit traject te maken, waarna het vrij eenvoudig zou moeten zijn om de overige lijnen te doen aansluiten op dit traject.. Voor de dienstregeling gebruiken ze een gerichte acyclische multi-graaf om een geheeltallige lineaire probleem te maken. In tegenstelling tot andere artikelen gebruiken ze bij deze formulering alleen de punten van de multi-graaf en wordt er niets gedaan met de bijbehorende bogen. Het model wordt uiteindelijk gerelaxeerd met Lagrange.

Knijff (2010) is naar ons weten de enige die begonnen is om dit probleem goed in kaart te brengen en een eerste stap te maken naar een model die dit probleem snel op kan lossen. Knijff beschrijft in zijn scriptie een heuristiek die twee stappen nodig heeft. In de eerste stap worden de beschikbare treinen toegewezen aan de verschillende bestemmingen en in de tweede stap moeten de ritten die deze treinen gaan maken worden gekoppeld aan vertrektijden. In zijn scriptie werkt Knijff de eerste stap uit en maakt hierbij de keuze om penalty's toe te wijzen als bestemmingen niet worden aangedaan of als de reizigers niet met de trein mee kunnen reizen gedurende de alternatieve dienstregeling. De looptijd van deze alternatieve dienstregeling wordt arbitrair gekozen en ligt vast.

We gaan in deze scriptie verder op het model van Knijff, maar we maken de looptijd van de alternatieve dienstregeling wel variabel. Uiteindelijk willen we alle reizigers naar plek van bestemming toebrengen.

4. Modelformuleringen

In dit hoofdstuk gaan we allereerst kijken naar de informatie die we van te voren nodig hebben om een model goed te laten werken. Vervolgens kijken we naar aannamen die we maken om het model niet onnodig ingewikkeld te maken en tenslotte gaan we kijken naar twee verschillende modellen die we in deze scriptie gaan presenteren.

4.1 Noodzakelijk informatie

Voor het maken van een goede alternatieve dienstregeling is bepaalde informatie essentieel. Deze informatie valt te categoriseren in:

a) Algemene informatie, informatie die alvorens de verstoring opgezocht en opgeslagen kan worden. Hierbij valt te denken aan:

- De omringende grote stations waar de intercity's stoppen en hoelang een stoptrein en een intercity onderweg zijn van het station naar deze plaatsen. Hierna te noemen: *de intercitystations*.

- De stations tussen *het station* en *de intercitystations* waar de stoptreinen stoppen. Hierna te noemen: *de stoptreinstations*.

- De lengte van de perrons van de verschillende stations.

- De tijd die tussen twee opvolgende treinen naar een bepaalde bestemming moet zitten.

- De tijd die nodig is om passagiers uit en vervolgens weer in te laten stappen.

- Karakteristieke gegevens van de verschillende type treinen. Te denken valt dan aan de lengte van de trein, de hoeveelheid passagiers dat vervoerd kan worden en welke treinen aan elkaar gekoppeld kunnen worden.

b) Storingspecifieke informatie, informatie die tijdens de storing pas verzameld kan worden. Hierbij valt de denken aan:

- Een puntschatting van het aantal reizigers dat gedurende de storing is blijven wachten op en rond het station met de intentie om na de storing weer hun reis te vervolgen met de trein.

- Een puntschatting van het aantal reizigers dat gedurende de alternatieve dienstregeling op het station aankomt en blijft wachten met het doel om verder te reizen met de trein.

- Het aantal treinen van elk type, dat op het station beschikbaar is en bemand kan worden voor de looptijd van de alternatieve dienstregeling.

4.2 Algemene aannamen en simplificering

Omdat de werkelijkheid vrij complex is, zijn er een aantal aannamen die we moeten maken voor ons model:

- Passagiers met als eindbestemming een *stoptreinstation* zullen niet meereizen met een intercitytrein. Voor de stoptreinen is het onmogelijk om te voorspellen hoeveel stoptreinpassagiers en intercitypassagiers per trein zullen instappen. Daarom nemen we aan dat als een stoptrein vertrekt de stoptreinpassagiers als eerst instappen en als er vervolgens nog plek is zullen er intercitypassagiers meereizen.[7]

- De treinen die gebruikt kunnen worden voor de alternatieve dienstregeling blijven allemaal beschikbaar gedurende de alternatieve dienstregeling. Dit betekent ook dat zodra de alternatieve dienstregeling ingaat, alle treinen op een perron staan en gereed staan voor vertrek.

- Een gedeelte van de passagiers die vanaf een station via *het station* wilde reizen is omgeleid over een ander traject. Het aantal reizigers dat naar *het station* wil reizen is daarom kleiner dan het aantal dat vanaf *het station* wil reizen. Daarom gaan we er vanuit dat de totale capaciteit van de treinen die we gedurende de alternatieve dienstregeling naar een bestemming laten rijden, groot genoeg is om de passagiers dat naar *het station* wil, te vervoeren.

Ondanks het maken van bovenstaande aannamen, zullen we ook nog een aantal [zaken] versimpelen. Dit doen we met name omdat we denken dat dit voor de optimale oplossing nauwelijks verschil zal uitmaken, maar wel een significante invloed zal hebben op de rekentijd van het model.

- We zien de *intercitystations* als eindbestemming van de intercitymensen en kijken daarom niet naar de reguliere dienstregelingen voor de aansluitmomenten met andere treinen. Dit doen we omdat een groot gedeelte van deze mensen het *intercitystation* als eindbestemming heeft en de kleinere groep mensen naar veel verschillende plaatsen verder reist. Door de vele overstaptijden gaat het niet veel uitmaken hoe laat de trein aan zou komen. Daarnaast is het niet mogelijk om goed in beeld te krijgen in welke intercitytrein deze verschillende groepen passagiers zich in welke getale bevinden.

- We gaan er vanuit dat de *stoptreinstations* homogeen verdeeld zijn over de afstand tussen de *intercitystations* en *het station* en de passagiers die naar de *stoptreinstations* reizen, evenredig over deze stations verdeeld zijn.

- Treinen kunnen elkaar niet inhalen op een tussengelegen station.

[7] Als een stoptrein de minimale wachttijd na een Intercity vertrekt, is de kans vrij groot dat er alleen maar stoptreinpassagiers meereizen, zeker als de perrons van beide treinen ver van elkaar af liggen.

- Alle treinen die we tot onze beschikking hebben kunnen aan elkaar vast worden gekoppeld. Daarnaast zijn de perrons op de stations lang genoeg voor elke combinatie van gekoppelde treinen. Tenslotte gaan we er vanuit dat het (ont)koppelen van treinen geen extra tijd kost.

4.3 Verschillende modellen

Zoals eerder vermeld, gaan we in deze scriptie twee modellen met elkaar vergelijken. Het eerste model, het tweetrapsmodel en is een model dat de oplossing op ons probleem in twee stappen probeert op te lossen. In de eerste stap worden de trein toegewezen aan de verschillende bestemmingen (inclusief het aantal retourritten en of een trein als stoptrein of intercity fungeert) en in de tweede stap worden de retourritten die een trein maakt gekoppeld aan een vertrektijd. Het uitgebreide model probeert een optimale oplossing te vinden in één stap.

Het voordeel van een tweetrapsmodel is dat beide stappen relatief snel op te lossen zijn, het probleem is echter dat de “optimale oplossing” die uit het tweede model komt, niet de optimale oplossing van het gehele probleem hoeft te zijn. Het uitgebreide model slaagt hier wel in, maar gegeven de complexiteit van het probleem, zal dit model erg veel rekentijd nodig hebben. Daarom gaan we beide modellen met elkaar vergelijken op het gebied van rekentijd en kwaliteit van de oplossing.

5. Tweetrapsmodel – eerste trap

In dit hoofdstuk gaan we de eerste trap van het tweetrapsmodel behandelen. Als eerst kijken we naar het werk dat Knijff (2010) hierin al heeft verricht, vervolgens naar een belangrijke extra assumptie die voor dit model wordt gebruikt en vervolgens kijken we kort naar de notatie en de restricties van de eerste trap. Hierin zal de nadruk liggen op de verschillen van onze eerste trap met het model van Knijff.

5.1 Inleiding

In 2010 presenteerde Knijff de eerste trap van het tweetrapsmodel. Hij gaat hierin uit van een alternatieve acyclische dienstregeling die precies twee uur duurt. In deze tijd moeten zoveel mogelijk mensen naar plaats van bestemming worden gebracht met een beperkt aantal treinen. Als hij zijn model toepast op drie scenario's dan moet hij tot de conclusie komen, dat de alternatieve dienstregeling niet altijd iedereen in deze twee uur naar zijn bestemming kan brengen. Hiervoor introduceert Knijff penalty's om toch een keuze te kunnen maken waar welke treinen hoe vaak naartoe rijden.

Als we de missie van de NS zien, dan denken we dat de spoorwegmaatschappij meer gebaat is bij een model waarin de looptijd van de alternatieve dienstregeling variabel is en afhangt van het aantal reizigers dat op het station aan het wachten is. Daarom hebben we de penalty's uit het model van Knijff verwijderd en de doelstellingsfunctie veranderd. In onze eerste trappen streven we naar een zo kort mogelijke looptijd van de alternatieve dienstregeling.

Dit is een doelstelling die beter aansluit bij de tweede trap, die als doel heeft om de totale wacht- en reistijd van alle passagiers samen te minimaliseren. Als we een situatie hadden waarin alle passagiers gemakkelijk in twee uur naar de verschillende eindbestemmingen vervoerd konden worden, dan waren er in het model van Knijff erg veel verdelingen van de treinen over de bestemmingen mogelijk, nu zullen in elk geval de mensen die het langst moeten wachten, eerder aankomen.

5.2 Assumptie

Een belangrijke extra assumptie die Knijff maakt in zijn model, maar niet expliciet beschrijft, is dat alle treinen een pendeldienst draaien. Ze worden toegewezen aan een bepaalde bestemming en er wordt bepaald of ze tijdens de gehele alternatieve dienstregeling als stoptrein of als intercity rijden. Voor het model heeft dit als voordeel dat het snel tot een oplossing komt en we kunnen ons voorstellen dat dit voor de NS ook organisatorische voordelen heeft. Daarnaast heeft het voor de tweede trap als voordeel dat het probleem opgesplitst en geminimaliseerd kan worden voor elke eindbestemming, waardoor ook deze trap erg snel tot een oplossing zal komen.

Het nadeel hiervan is wel dat de dienstregeling langer kan duren dan noodzakelijk is. Als een bepaalde trein klaar is met zijn pendeldiensten dan wordt hij niet meer ingezet voor het vervoeren van passagiers naar andere plaatsen. Als de verschillen in aantal reizigers naar de verschillende bestemmingen groot zijn en/of het aantal beschikbare treinen per bestemming klein is, dan is het nadeel van deze aanname relatief groot. Als we echter moeten kiezen tussen een model dat veel rekentijd vereist, maar een goede oplossing vindt, met een model dat weinig rekentijd vereist, maar een minder goede oplossing vindt. Dan moeten we uiteindelijk toch voor laatstgenoemde gaan. Als iedereen op het station namelijk moet wachten op het model met een betere oplossing, dan is daardoor de oplossing alweer slechter.

5.3 Notatie eerste trap

In de eerste trap hebben we te maken met een set van treinen die worden aangeduid met $t = 1, \ldots, T$. De eindbestemmingen van de treinen worden aangeduid met $b = 1, \ldots, B$. Daarnaast worden de volgende parameters gebruikt in de eerste stap:

- A_b geeft het totaal aantal passagiers dat richting bestemming *b* wil reizen.
- S_b geeft het aantal passagiers dat richting bestemming *b* met de stoptrein wil reizen.
- C_t geeft de capaciteit van trein *t*.
- U_b geeft de totale reistijd van *het station* naar bestemming *b* met de stoptrein.
- V_b geeft de totale reistijd van *het station* naar bestemming *b* met de intercity.
- K geeft aan hoelang het voor een trein duurt om te keren op een station.
- M is een groot getal en in elk geval groter dan het maximale aantal keer dat een trein een pendelrit hoeft maken. Dit valt te berekenen door de grootste groep passagiers die dezelfde bestemming heeft te delen door de capaciteit van de kleinste trein.

De volgende beslissingsvariabelen worden in het model gebruikt:

- $Y_{t,b}$ een geheeltallige beslissingsvariabele die aangeeft hoe vaak trein *t* naar bestemming *b* vertrekt als stoptrein.
- $Z_{t,b}$ een geheeltallige beslissingsvariabele die aangeeft hoe vaak trein *t* naar bestemming *b* vertrekt als intercity.
- $X_{t,b}$ een binaire beslissingsvariabele die aangeeft of trein *t* naar bestemming *b* vertrekt.
- $Q_{t,b}$ een binaire beslissingsvariabele die aangeeft of trein *t* naar bestemming *b* vertrekt als stoptrein.
- $W_{t,b}$ een binaire beslissingsvariabele die aangeeft of trein *t* naar bestemming *b* vertrekt als intercity.
- L een geheeltallige beslissingsvariabele die de looptijd van de alternatieve dienstregeling in minuten aangeeft.

5.4 Model eerste trap

Doelstellingsfunctie

(5.4.1) $\min L$

Met de volgende restricties:

(5.4.2) $\sum_{t\in T}(C_t * Y_{t,b}) \geq S_b \quad \forall b \in B$

(5.4.3) $\sum_{t\in T}(C_t * (Y_{t,b} + Z_{t,b})) \geq A_b \quad \forall b \in B$

(5.4.4) $Y_{t,b} \leq M * Q_{t,b} \quad \forall t \in T\ \forall b \in B$

(5.4.5) $Y_{t,b} \leq 0.5(\frac{L}{U_b+K} + 1) \quad \forall t \in T\ \forall b \in B$

(5.4.6) $Z_{t,b} \leq M * W_{t,b} \quad \forall t \in T\ \forall b \in B$

(5.4.7) $Z_{t,b} \leq 0.5(\frac{L}{V_b+K} + 1) \quad \forall t \in T\ \forall b \in B$

(5.4.8) $X_{t,b} = Q_{t,b} + W_{t,b} \quad \forall t \in T\ \forall b \in B$

(5.4.9) $\sum_{t\in T} X_{t,b} \geq 1 \quad \forall b \in B$

(5.4.10) $\sum_{b\in B} X_{t,b} \leq 1 \quad \forall t \in T$

(5.4.11) $X_{t,b}\ ;\ Q_{t,b}\ ; W_{t,b} \in \mathbb{B}$

(5.4.12) $Y_{t,b}\ ;\ Z_{t,b}\ ; L \in \mathbb{N}$

In deze aangepaste eerste trap zien we een nieuwe doelstellingsfunctie, we minimaliseren het aantal minuten dat de alternatieve dienstregeling van kracht is.

Restricties (5.4.2) forceren dat voor elke bestemming geldt dat de capaciteit van de stoptreinen die we hier naartoe laten gaan, groter moet zijn dan het aantal stoptreinpassagiers die deze richting op moet. Restricties (5.4.3) lijken hier erg op en zorgen ervoor dat de totale capaciteit van de intercity's en de stoptreinen samen groter zijn dan het totaal aantal passagiers voor een bepaalde bestemming.

Restricties (5.4.4) en (5.4.5) geven respectievelijk aan dat het aantal keer dat trein *t* als stoptrein richting bestemming *b* gaat, kleiner moet zijn dan het maximum aantal keer dat nodig is dat een trein richting een bestemming gaat en kleiner dan het aantal keer dat trein *t* als stoptrein naar bestemming *b kan* gaan gegeven de tijdsduur van de alternatieve dienstregeling en de reistijd. Deze restricties vormen samen restrictie (4) uit het model van Knijff. Restricties (5.4.6) en (5.4.7) geven hetzelfde aan maar dan voor intercity's.

Omdat in ons model zowel $Q_{t,b}$ als L beslissingsvariabelen zijn, hebben we deze restricties opgesplitst. Hierdoor blijft het model lineair en wordt het niet kwadratisch.

Restricties (5.4.8) geven aan dat een trein gedurende de alternatieve dienstregeling niet en als intercity en als stoptrein kan fungeren.

Ook bij restricties (5.4.9) hebben we de penalty's weggehaald. Elke bestemming moet minimaal één keer worden aangedaan door een trein. Restricties (5.4.10) zorgen ervoor dat een trein maar maximaal één eindbestemming heeft gedurende de alternatieve dienstregeling.

6. Tweetrapsmodel – tweede trap

In dit hoofdstuk behandelen we de tweede trap van het tweetrapsmodel. We gaan eerst kijken naar de algemene opzet van de tweede trap en vervolgens naar de notatie en de restricties.

6.1 Inleiding

In de eerste trap van het tweetrapsmodel berekende we met het model hoeveel retourritten een bepaalde trein naar een bepaalde plaats als intercity of als stoptrein maakte. Deze output gebruiken we als input voor het tweede model om te berekenen hoe laat elke rit plaats moet gaan vinden.

6.2 Notatie tweede trap

In de tweede trap worden de treinen aangeduid met t = 1, …, T. De eindbestemmingen worden aangeduid met b = 1, …, B. De treinformules intercity en stoptreinen zijn aangeven met f = *IC, ST*. Wanneer een trein naar een intercitystation rijdt, dan h = *heen* en rijdt de trein terug, dan h = *terug*. Het ritnummer wordt aangeven met r = 1, …, R. Tijdseenheden in minuten wordt aangegeven met m = 1, …, M. Rit r begint altijd op tijdstip $m = r$, M wordt dusdanig groot gekozen dat in deze tijd alle passagiers optimaal vervoerd kunnen worden. Als laatste worden de intercitypassagiers en de stoptreinpassagiers aangeven met p = *IC, ST*. Daarnaast worden de volgende parameters gebruikt in het model:

- N_r geeft aan op welk tijdstip rit r vertrekt. $N_r = r$
- π_b geeft aan hoeveel minuten na het vertrek van een stoptrein richting bestemming b een intercity mag vertrekken in dezelfde richting. Deze tijd is te berekenen door de minimale tijd dat tussen twee aankomsttijden van treinen behoort te zitten op te tellen bij het verschil in reistijd van de intercity en de stoptrein naar bestemming b.
- $D_{p,b,f}$ geeft de duur van een rit aan voor passagierstype p als hij meerijdt met treinformule f richting bestemming b.
- $A_{p,b}$ geeft aan hoeveel passagiers naar intercityplaats p met treinsoort s willen reizen.
- C_t geeft de capaciteit van trein t aan.
- $E_{b,f,h,r,m}$ is (1/0) als een trein van of naar bestemming b als treinformule f op tijdstip t (wel/niet) rijdt of keert als hij rit r rijdt.
- $Kff_{t,b,f}$ geeft de output van de eerste trap: hoe vaak trein t naar bestemming b reist als treinformule f.
- γ geeft aan hoeveel treinen we tot onze beschikking hebben.
- τ geeft het totaal aantal tijdseenheden. $\tau = M$
- μ geeft de minimumtijd die tussen twee vertrekkende treinen van plaats b of twee aankomende treinen op plaats b moet zitten.

De volgende beslissingsvariabelen worden in het model gebruikt:

$W_{t,b,f,h,r}$	een binaire beslissingsvariabele die aangeeft of trein *t* rit *r* kiest naar bestemming *b* met treinformule *f* in richting *h*
$Q_{p,t,b,f,r}$	een geheeltallige beslissingsvariabele die aangeeft hoeveel passagiers van type *p* meegaan met trein *t* op rit *r* naar bestemming *b* met treinformule *f* in richting *h*. Omdat stoptreinpassagiers niet meegaan met intercity's, bestaan de variabelen $Q_{ST,t,b,IC,r}$ niet. $Q_{p,t,b,f,r}$ kan alleen groter dan nul zijn als deze specifieke rit *r* door trein *t* ook gereden wordt.
$X_{b,h,r}$	een binaire beslissingsvariabele of er in richting *h* naar bestemming *b* een intercity rit *r* kiest.
$Y_{b,h,r}$	een binaire beslissingsvariable of er in richting *h* naar bestemming *b* een stoptrein rit *r* kiest.

6.3 Model tweede trap

Doelstellingsfunctie:

(6.3.1) $$min \sum_{p\in P} \sum_{t\in T} \sum_{b\in B} \sum_{f\in F} \sum_{r\in R} \left(N_r + D_{p,b,f}\right) \cdot Q_{p,t,b,f,r}$$

Met de volgende restricties:

(6.3.2) $\sum_{b\in B} \sum_{f\in F} \sum_{h\in H} \sum_{r\in R} (W_{t,b,f,h,r} \cdot E_{b,f,h,r,m}) \leq 1 \qquad \forall t \in T\ \forall m \in M$

(6.3.3) $\sum_{b\in B} \sum_{f\in F} \sum_{r=1}^{r'} (W_{t,b,f,heen,r} - W_{t,b,f,terug,r}) \leq 1 \qquad \forall t \in T\ \forall r' \in R$

(6.3.4) $\sum_{r=1}^{r'} (W_{t,b,f,heen,r} - W_{t,b,f,terug,r}) \geq 0 \qquad \forall t \in T\ \forall r' \in R\ \forall b \in B\ \forall f \in F$

(6.3.5) $\sum_{r=r'}^{r'+\mu-1} (X_{b,h,r} + Y_{b,h,r}) \leq 1 \qquad \forall b \in B\ \forall h \in H\ \forall r' \in R$

(6.3.6) $Y_{b,h,r} + \sum_{r=r'+\mu}^{r'+\pi_p-1} X_{b,h,r} \leq 1 \qquad \forall b \in B\ \forall h \in H\ 1 \leq r' \leq (\tau + 1 - \pi_b)$

(6.3.7) $\sum_{t\in T} \sum_{f\in F} \sum_{r\in R} Q_{p,t,b,f,r} \geq A_{p,b} \qquad \forall b \in B\ \forall p \in P$

(6.3.8) $Q_{IC,t,b,IC,r} \leq W_{t,b,IC,heen,r} \cdot C_t \qquad \forall t \in T\ \forall b \in B\ \forall r \in R$

(6.3.10) $\sum_{p\in P} Q_{p,t,b,ST,r} \leq W_{t,b,ST,heen,r} \cdot C_t \qquad \forall t \in T\ \forall b \in B\ \forall r \in R$

(6.3.11) $\sum_{t\in T} W_{t,b,IC,h,r} \leq \gamma * X_{b,h,r} \qquad \forall b \in B\ \forall h \in H\ \forall r \in R$

(6.3.12) $\sum_{t\in T} W_{t,b,ST,h,r} \leq \gamma * Y_{b,h,r} \qquad \forall b \in B\ \forall h \in H\ \forall r \in R$

(6.3.13) $\sum_{r\in R} W_{t,b,f,heen,r} \leq Kff_{t,b,f} \qquad \forall t \in T\ \forall b \in B\ \forall f \in F$

(6.3.14) $W_{t,b,f,h,r}\ ; X_{b,h,r}\ ; Y_{b,h,r} \in \mathbb{B}$

(6.3.15) $Q_{p,t,b,f,r} \in \mathbb{N}$

6.4 Doelstellingsfunctie tweede trap

Voor onze doelstelling willen we weten hoe laat elke passagier aankomt op zijn eindbestemming en dit uiteindelijk sommeren over alle passagiers. Daarom moeten we weten hoe laat elke passagier een trein instapt en hoelang deze trein erover doet.

Elke rit *r* vertrekt op tijdstip *t* = *r*, dus als we bij N_r (is per definitie *r* en dus de vertrektijd) de duur van de rit voor een bepaald persoon bij optellen ($D_{p,b,f}$) dan hebben we het tijdstip dat de passagier aankomt op plek van eindbestemming. Deze aankomsttijd kunnen we vermenigvuldigen met het aantal passagiers van type *p* dat meegaat met rit *r*.

6.5 Restricties tweede trap

Het model draait voornamelijk om de restricties (6.3.2), welke gebaseerd zijn op het set packing model. Deze restricties zorgen ervoor dat elke trein in elke minuut maar maximaal met 1 rit (of het keren na deze rit) bezig kan zijn. Aan de treinen worden ritten toebedeeld die dankzij deze restrictie pas kunnen plaatsvinden als de vorige rit voltooid is.

Restricties (6.3.3) zorgen ervoor dat voor elke trein *t* geldt dat na een heenrit een terugrit moet volgen. Restricties (6.3.4) zorgen ervoor dat trein *t* nooit vaker als treinformule *f* vanaf bestemming *b terug* kan reizen dan *heen*. Restricties (6.3.3) en (6.3.4) zorgen er samen voor dat als een rit richting bestemming *b* als treinformule *f* aan trein *t* wordt toegewezen, dat trein *t* daarna een rit krijgt toebedeeld als treinformule *f terug* vanaf bestemming *b*.

Restricties (6.3.5) zorgen ervoor dat elke μ minuten er maximaal 1 moment is waarop stoptreinen of intercity's vanaf een station naar een andere bestemming mogen vertrekken. Als er meerdere intercity's/stoptreinen op hetzelfde moment naar dezelfde bestemming vertrekken, dan zijn deze aan elkaar gekoppeld. Een stoptrein kan niet aan een intercity worden gekoppeld.

Restricties (6.3.6) zorgen ervoor dat er minimaal μ minuten tussen twee treinaankomsten op een bepaalde bestemming zit. Omdat intercity's sneller rijden dan stoptreinen, kan er (π_b -1) minuten na het vertrek van een stoptrein nog geen intercity vertrekken.

Restricties (6.3.7) zorgen ervoor dat het aantal stoptrein- en intercitypassagiers dat naar een bestemming vervoerd wordt, minstens even groot is als het aantal stoptrein- en intercitypassagiers dat die kant op wil reizen.

Restricties (6.3.8) geven aan dat als we trein *t* als een intercity naar bestemming *b* sturen op tijdstip *t* = *r*, dan kunnen hier maximaal C_t intercitypassagiers in mee. Als we een stoptrein sturen (6.3.9) dan kunnen hier zowel stop- als intercitypassagiers in mee en weer maximaal C_t.

Restricties (6.3.10) en (6.3.11) geven aan dat als $X_{b,h,r}$ respectievelijk $Y_{b,h,r}$ gelijk aan 1 is, er intercity's en stoptreinen kunnen vertrekken in richting *h* ten opzichte van bestemming *b* op tijdstip $t = r$.

Restricties (6.3.12) geven aan dat het aantal keer dat trein *t* naar bestemming *b* rijdt als treinformule *f* niet groter mag zijn dan het aantal keer dat als output is gekomen uit de eerste trap van het tweetrapsmodel.

Restricties (6.3.13) en (6.3.14) geven aan dat we een rit wel of niet toebedelen, dat er op tijdstip $t = r$ wel of geen intercity's/stoptreinen richting *h* t.o.v. bestemming *b* rijden en dat het aantal passagiers van type *p* dat met een trein meerijdt geheeltallig is.

7. Uitgebreid model

In dit hoofdstuk behandelen we het uitgebreide model. We gaan eerst kijken naar de verschillen tussen het tweetrapsmodel en het uitgebreide model, om vervolgens goed te kijken naar de modelformulering.

7.1 Assumptie

In het tweetrapsmodel reden de treinen als pendeldienst heen en weer tussen het station en de intercitystations. Bij het uitgebreide model laten we deze assumptie vallen en is het *mogelijk* voor trein *t* om na een rit naar bestemming *b* als treinformule *f*, verder te gaan naar bestemming *b'* (*b'* ≠ *b*) als treinformule *f'* (*f'* ≠ *f*).

Het is in het uitgebreide model mogelijk dat gekoppelde treinen na een gezamenlijke terugrit, afzonderlijk verder gaan naar verschillende bestemmingen. Als beide treinen het station aan een tegengestelde kant willen verlaten, zou dit geen probleem moeten zijn. Omdat we in deze scriptie niet kijken naar het transport van de treinen op de stations, gaan we er vanuit dat als twee treinen op een station ontkoppeld worden en vervolgens naar verschillende plaatsen vertrekken, dat deze treinen niet op elkaar hoeven te wachten.

7.2 Model

(6.3.1) $$min \sum_{p\in P}\sum_{t\in T}\sum_{b\in B}\sum_{f\in F}\sum_{r\in R}\left(N_r + D_{p,b,f}\right)\cdot Q_{p,t,b,f,r}$$

Met de volgende restricties:

(6.3.2) $\sum_{b\in B}\sum_{f\in F}\sum_{h\in H}\sum_{r\in R}(W_{t,b,f,h,r} \cdot E_{b,f,h,r,m}) \leq 1 \qquad \forall t \in T\ \forall m \in M$

(6.3.3) $\sum_{b\in B}\sum_{f\in F}\sum_{r=1}^{r\prime}(W_{t,b,f,heen,r} - W_{t,b,f,terug,r}) \leq 1 \qquad \forall t \in T\ \forall r' \in R$

(6.3.4) $\sum_{r=1}^{r'}(W_{t,b,f,heen,r} - W_{t,b,f,terug,r}) \geq 0 \qquad \forall t \in T\ \forall r' \in R\ \forall b \in B\ \forall f \in F$

(6.3.5) $\sum_{r=r\prime}^{r'+\mu-1}(X_{b,h,r} + Y_{b,h,r}) \leq 1 \qquad \forall b \in B\ \forall h \in H\ \forall r' \in R$

(6.3.6) $Y_{b,h,r} + \sum_{r=r\prime+\mu}^{r'+\pi_p-1} X_{b,h,r} \leq 1 \qquad \forall b \in B\ \forall h \in H\ 1 \leq r' \leq (\tau + 1 - \pi_b)$

(6.3.7) $\sum_{t\in T}\sum_{f\in F}\sum_{r\in R} Q_{p,t,b,f,r} \geq A_{p,b} \qquad \forall b \in B\ \forall p \in P$

(6.3.8) $Q_{IC,t,b,IC,r} \leq W_{t,b,IC,heen,r} \cdot C_t \qquad \forall t \in T\ \forall b \in B\ \forall r \in R$

(6.3.10) $\sum_{p\in P} Q_{p,t,b,ST,r} \leq W_{t,b,ST,heen,r} \cdot C_t \qquad \forall t \in T\ \forall b \in B\ \forall r \in R$

(6.3.11) $\sum_{t\in T} W_{t,b,IC,h,r} \leq \gamma * X_{b,h,r} \qquad \forall b \in B\ \forall h \in H\ \forall r \in R$

(6.3.12) $\sum_{t\in T} W_{t,b,ST,h,r} \leq \gamma * Y_{b,h,r} \qquad \forall b \in B\ \forall h \in H\ \forall r \in R$

(6.3.14) $W_{t,b,f,h,r}\ ; X_{b,h,r}\ ; Y_{b,h,r} \ \in\ \mathbb{B}$

(6.3.15) $Q_{p,t,b,f,r} \in \mathbb{N}$

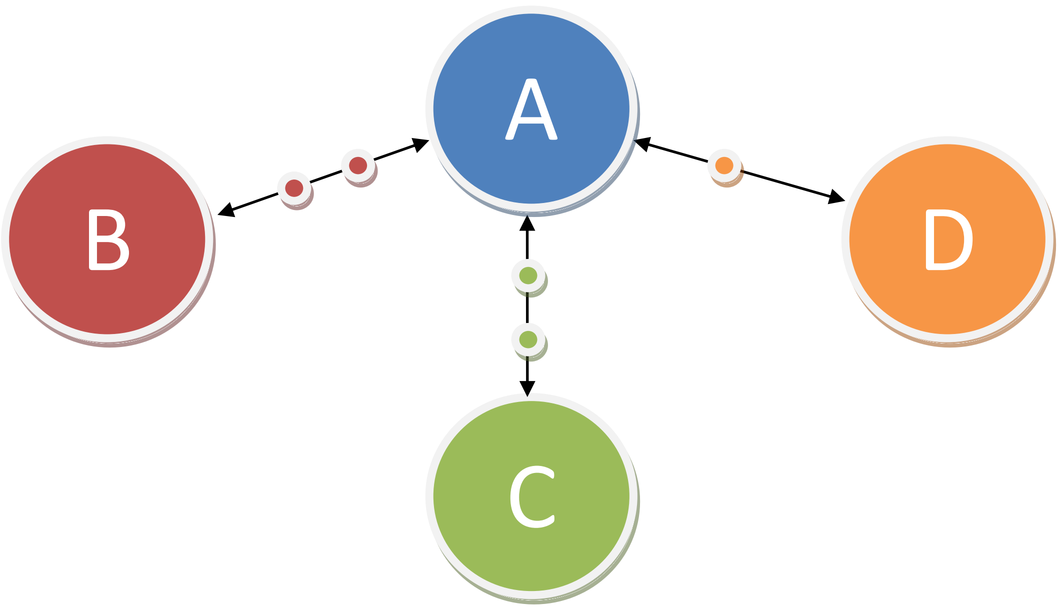
Het grote essentiële verschil met het de tweede trap van het tweetrapsmodel is dat de restricties (6.3.12) zijn weggehaald. Aan trein *t* kunnen ritten toegewezen worden waarbij de treinformule of de bestemming per keer verschilt.

8. Scenario's

Om de verschillende modellen te testen en vervolgens met elkaar te vergelijken, is het noodzakelijk om verschillende scenario's te definiëren. Daarom gaan we in dit hoofdstuk eerst kijken naar een specifieke situatie en vervolgens naar drie verschillende scenario's.

8.1 Situatieschets

We hebben te maken met vier verschillende plaatsen met een station: A, B, C en D. Station A is gedurende een langere periode onbereikbaar geweest vanwege een stroomstoring. Station B, C en D zijn intercitystations bereikbaar vanaf station A en tussen A en de intercitystations liggen enkele stoptreinstations:



figuur 1: een grafische weergave van de situatie

Op station A zijn in totaal 8 treinen beschikbaar die bemand kunnen worden door het aanwezige personeel:

Treinnummer	1	2	3	4	5	6	7	8
Capaciteit	830	830	900	900	750	800	1000	1000

tabel 1: de beschikbare treinen en hun capaciteit

Er moet minimaal drie minuten zitten tussen twee vertrekkende of aankomende treinen op een bepaalde route. Een trein heeft daarnaast vijf minuten nodig om op een intercitystation zijn passagiers uit te laten stappen en nieuwe passagiers in te laten stappen.

De duur van de verschillende ritten staat aangeven in tabel 2:

Bestemming	B	C	D
Stoptrein	18 minuten	20 minuten	12 minuten
Intercity	14 minuten	16 minuten	9 minuten

tabel 2: de duur van een rit van station A naar de andere stations door de verschillende treinformules

8.2 Verschillende scenario's

We gebruiken drie scenario's om de modellen met elkaar te vergelijken en om meer inzicht te krijgen in de optimale dienstregelingen bij specifieke situaties.

Scenario 1: (het basisscenario)

Scenario 1 is hetzelfde scenario wat Knijff (2010) in zijn scriptie behandelt. We zien in dit scenario drie bestemmingen (plaats B, C en D) waarvan de passagiersaantallen niet ver uit elkaar liggen. Ook de verhoudingen tussen stoptrein- en intercitypassagiers voor de verschillende bestemmingen, zijn niet zo verschillend:

Type passagier / Bestemming	Stoptrein	Intercity	Totaal
B	1500	3000	4500
C	2250	3750	6000
D	1200	2300	3500

tabel 3: de passagiersaantallen per bestemming en treinformule voor scenario 1

De verwachting is dat, vanwege de verdeling van de passagiers, het verschil in kwaliteit van de oplossingen van de twee modellen, niet zo groot zal zijn.

Scenario 2: (het extreme scenario)

In het tweede scenario gaan we kijken naar een situatie waarin de passagiersaantallen per bestemming erg verschillen. Voor bestemming D geldt daarnaast dat er meer stoptrein- dan intercitypassagiers naartoe willen:

Type passagier / Bestemming	Stoptrein	Intercity	Totaal
B	300	900	1200
C	3200	4800	8000
D	3500	1500	5000

tabel 4: de passagiersaantallen per bestemming en treinformule voor scenario 2

Vanwege het feit dat het tweetrapsmodel uitgaat van pendeldiensten, gaan we er vanuit dat het verschil tussen de oplossingen van de modellen groter zal zijn. Zodra de 1200 reizigers naar plaats B vervoerd zijn, wordt deze trein niet meer ingezet voor andere bestemmingen, terwijl deze trein dat in het uitgebreide model wel zou doen. Daarnaast verwachten we dat er geen intercity's ingezet zullen worden naar de plaatsen B en D. De passagiersaantallen hiervoor zijn relatief klein. Omdat we maar acht treinen ter beschikking hebben en we de meeste voor bestemming C nodig hebben, kunnen we het niet veroorloven om naar deze plaatsen een stoptrein én een intercity te laten reizen.

Scenario 3 (het realistische scenario)

De eerste twee scenario's zijn vooral interessant om te zien wat bepaalde afwijkingen wat betreft bezoekersaantallen doet met het verschil tussen de oplossingen en met de uiteindelijke dienstregeling. In het derde scenario gaan we kijken wat een realistischer situatie voor invloed zal hebben op de rekentijd van de modellen. In dit scenario hebben we niet drie, maar vijf bestemmingen. Station E heeft relatief veel tussenstations terwijl station F geen tussenstations kent:

Bestemming	B	C	D	E	F
Stoptrein	18 minuten	20 minuten	12 minuten	19 minuten	n.v.t.
Intercity	14 minuten	16 minuten	9 minuten	10 minuten	5 minuten

tabel 5: de duur van een rit van station A naar de andere stations door de verschillende treinformules voor scenario 3

Daarnaast hebben we in dit scenario twee treinen extra tot onze beschikking, één trein met een capaciteit van 750 en de ander van 830 passagiers:

Treinnummer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Capaciteit	830	830	900	900	750	800	1000	1000	750	830

tabel 6: de beschikbare treinen en hun capaciteit voor scenario 3

De passagiersaantallen staan aangeven in tabel 7. Omdat bestemming F geen tussenstations kent, zijn er ook geen stoptreinpassagiers voor deze bestemming:

Type passagier / Bestemming	Stoptrein	Intercity	Totaal
B	2250	4500	6750
C	3200	5800	9000
D	1800	3450	5250
E	2500	4500	7000
F	0	1200	1200

tabel 7: de passagiersaantallen per bestemming en treinformule voor scenario 3

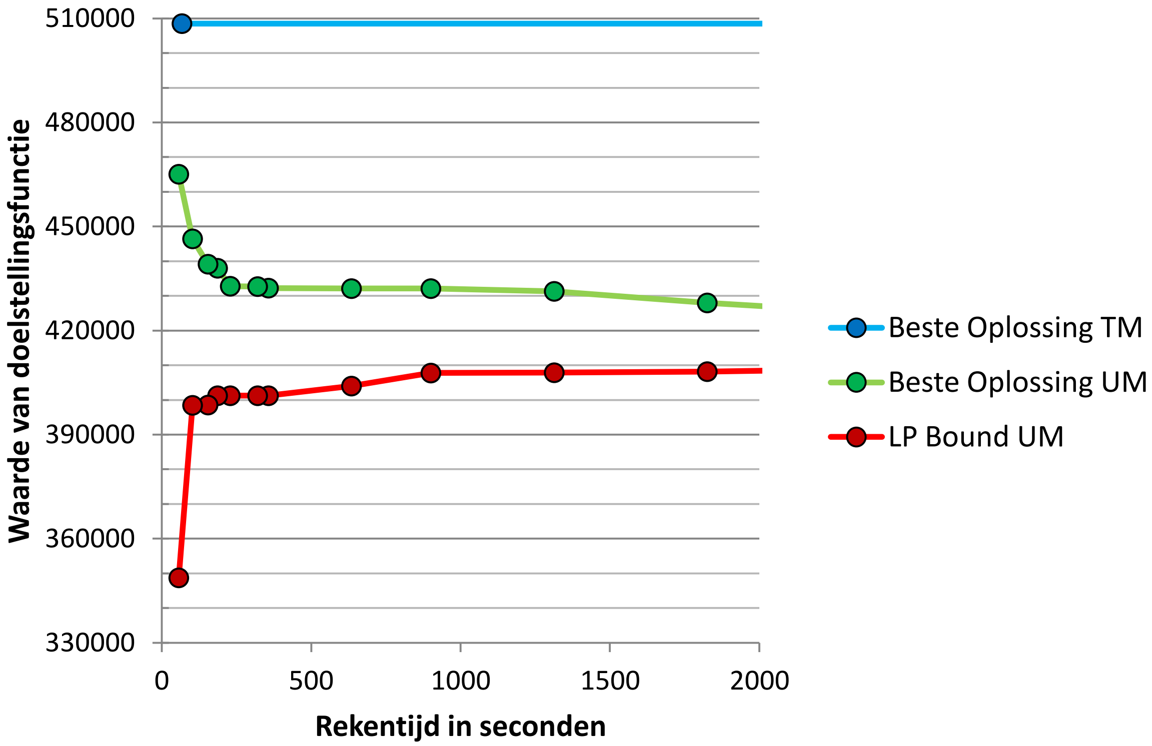
Vanwege de vele combinaties van toewijzingen van de ritten aan de treinen, verwachten we dat het verschil in rekentijd tussen de twee modellen groot zal zijn. De kwaliteit van de oplossingen zal procentueel waarschijnlijk meer verschillen dan bij de eerdere twee scenario's.

9. Resultaten

In dit hoofdstuk presenteren we onze resultaten voor het tweetrapsmodel en het uitgebreide model. Beide modellen hebben we geïmplementeerd in AIMMS 3.10 en laten oplossen met Gurobi 3.0. De computer die we hiervoor gebruikten had een AMD Athlon™ II X2 B24 Processor met 3GHz en 3.5 GB RAM. We gaan per scenario kijken naar het verschil in rekentijd en de kwaliteit van de oplossingen. De uiteindelijke output van de modellen, de dienstregelingen staan in de Appendix.

9.1 Scenario 1 en 2

In figuur 2 zien we van zowel het tweetrapsmodel (TM) als het uitgebreide model (UM) het verloop van de beste oplossing die tot dan toe gevonden is. Daarnaast staat de ondergrens van de optimale oplossing van het uitgebreide model (LP Bound UM) aangegeven. Daarnaast zien we in tabel 8 de doelstellingswaarde van de modellen bij verschillende ijkmomenten (2, 5, 10 en 30 minuten, 4 uur en de momenten wanneer de modellen voor het eerst een mogelijke oplossing vinden).



figuur 2: kwaliteit van de oplossingen afgezet tegen de tijd voor scenario 1

Rekentijd	56 sec	67 sec	2 min	5 min	10 min	30 min	4 uur
Oplossing TM	n.v.t.	508.520	508.520	508.520	508.520	508.520	508.520
Oplossing UM	465.100	465.100	446.470	432.810	432.270	431.340	424.360
UM % Beter	n.v.t.	8,5%	12,2%	14,9%	15,0%	15,2%	16,5%

tabel 8: de best gevonden oplossingen tot dan toe na een bepaalde rekentijd voor scenario 1

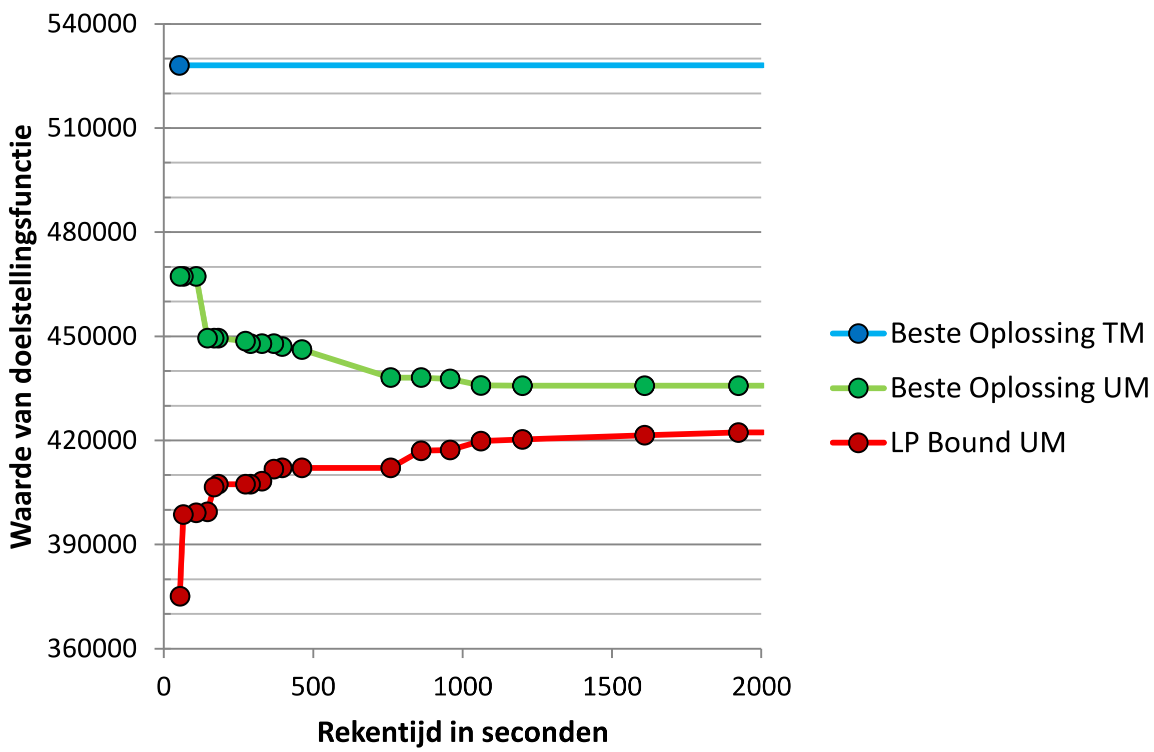
Na 56 seconden heeft het uitgebreide model al een mogelijke oplossing gevonden, terwijl het tweetrapsmodel pas na 67 seconden een oplossing vindt. Mocht de werkelijkheid zo simpel zijn als het basisscenario (inclusief alle aannamen), dan zouden we dus op basis van rekentijd en kwaliteit van de oplossingen het uitgebreide model prefereren boven het tweetrapsmodel.

De uitkomsten van scenario 1 die vooral interessant zijn, staan in de onderste rij van figuur 8. Hier zien we het percentage dat de oplossing van het uitgebreide model lager is dan de oplossing van het uitgebreide model. Deze gegevens kunnen we namelijk vergelijken met een extremere situatie (scenario 2). We zien in tabel 9, dat het relatieve verschil in een extremere situatie niet veel groter is dan in een evenwichtigere situatie.

Rekentijd	52 sec	54 sec	2 min	5 min	10 min	30 min	4 uur
Oplossing TM	528.040	528.040	528.040	528.040	528.040	528.040	528.040
Oplossing UM	n.v.t.	467.260	467.260	447.890	446.180	435.770	435.470
UM % Beter	n.v.t.	11,5%	11,5%	15,2%	15,5%	17,5%	17,5%

tabel 9: de best gevonden oplossingen tot dan toe na een bepaalde rekentijd voor scenario 2

We zien bij zowel scenario 1 als 2, dat de beste oplossing tot een bepaalde rekentijd na vijf minuten niet snel meer beter wordt. Als er snel een model moet zijn, voegt het weinig toe om het uitgebreide model langer dan vijf minuten te laten runnen.



figuur 3: kwaliteit van de oplossingen afgezet tegen de tijd voor scenario 2

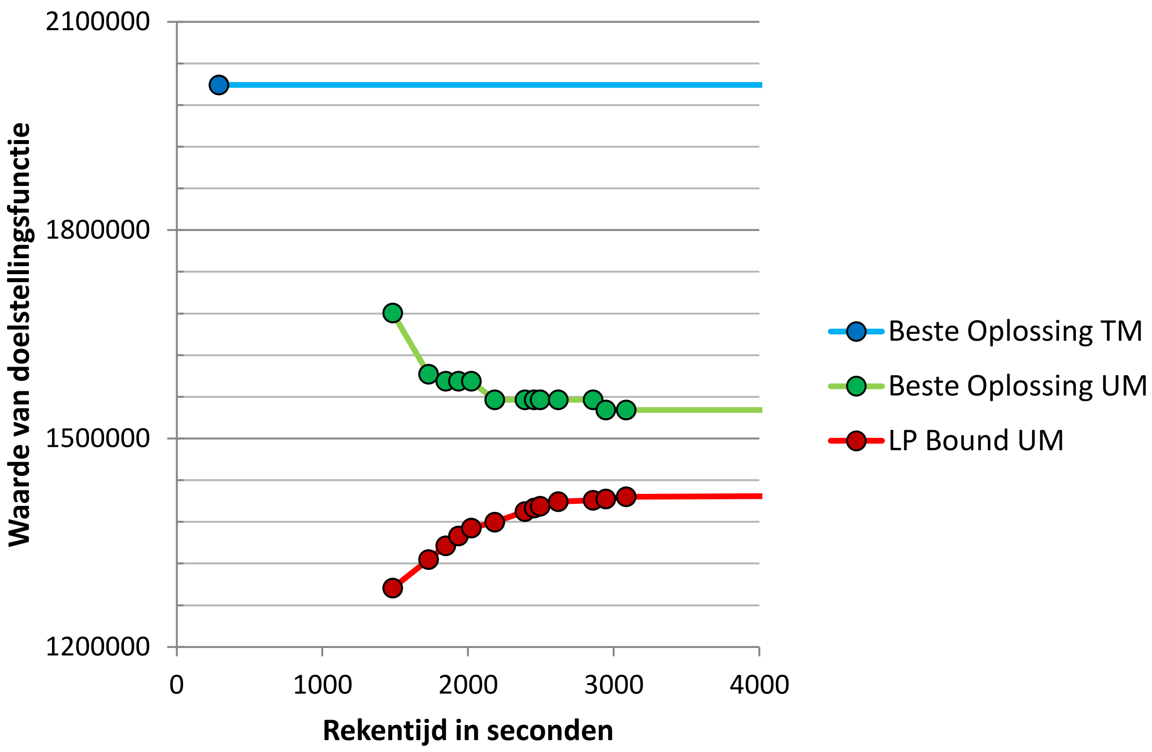
9.2 Scenario 3

Als we naar de uitkomsten van scenario 3 kijken, dan zien we een groot verschil tussen de eerste tijd waarop de modellen een eerste oplossing vinden. Het tweetrapsmodel vindt binnen drie minuten zijn optimale oplossing, terwijl het uitgebreide model er bijna 25 minuten over doet om een mogelijke oplossing te vinden.

Rekentijd	289 sec	1482 sec	30 min	1 uur	4 uur
Oplossing TM	2.008.960	2.008.960	2.008.960	2.008.960	2.008.960
Oplossing UM	n.v.t.	1.680.680	1.592.580	1.541.050	1.532.250
UM % Beter	n.v.t.	16,3%	20,7%	23,3%	23,7%

tabel 10: de best gevonden oplossingen tot dan toe na een bepaalde rekentijd voor scenario 3

We zien echter wel dat het relatieve verschil van de beste oplossingen tot dan toe voor de verschillende peilmomenten groter is dan bij de eerste twee scenario's.



figuur 4: kwaliteit van de oplossingen afgezet tegen de tijd voor scenario 3

10. Conclusie

Als er een verstoring plaats vindt op een belangrijk knooppunt, dan is het in het belang van de reiziger en de spoorwegmaatschappij, dat na de verstoring de treinen zo spoedig mogelijk weer gaan rijden. Bij een lange verstoring kan het in het algemeen belang zijn om gedurende een beperkte tijd een alternatieve dienstregeling in te zetten om de gestrande reizigers zo spoedig mogelijk naar de aanliggende knooppunten te brengen.

Dit specifieke probleem is in de literatuur, met uitzonderin van Knijff (2010), naar ons weten nog niet behandeld. Omdat we op een bepaald startmoment met beperkte middelen grote groepen verschillende kanten op moeten vervoeren, hebben we te maken met een dienstregeling die acyclisch mag zijn. Soortgelijke problemen zouden we kunnen tegenkomen bij evacuaties, het verplaatsen van milities in oorlogsgebieden of de bevoorrading van supermarkten.

We hebben in deze scriptie gekeken naar twee modellen om deze alternatieve dienstregeling zo vorm te geven dat alle reizigers samen zo weinig mogelijk extra wacht- en reistijd hebben. Het eerste model, het tweetrapsmodel, verdeelt de treinen eerst over de verschillende bestemmingen en koppelt vervolgens een rit aan een vertrektijd. Het tweede model maakt het voor een trein mogelijk om gedurende de alternatieve dienstregeling naar meerdere bestemmingen te rijden. Dit zorgt voor een oplossing van een hogere kwaliteit voor de reizigers, maar de rekentijd van het model kan hierbij wel enorm toenemen.

Als we naar de realiteit kijken, dan hebben we te maken met een restrictie in onze rekentijd. We kunnen ons niet permitteren om een model tientallen minuten te laten rekenen om een goede oplossing te vinden. Het tweetrapsmodel laat zien dat het binnen afzienbare tijd een oplossing kan vinden voor een realistische situatie. Het is echter wel lastig om de twee trappen goed op elkaar aan te laten sluiten zonder de mooie eigenschappen van het model kwijt te raken. Zo hebben we bijvoorbeeld geprobeerd om de tijd van de dienstregeling per bestemming te minimaliseren, de rekentijd nam hierdoor echter significant toe.

Op basis van de gevonden dienstregelingen hebben we het vermoeden gekregen dat voor situaties met veel reizigers, de optimale oplossing van ons probleem bepaalde eigenschappen bevat:

- de capaciteit van alle treinen moet tot aan het eind van de alternatieve dienstregeling zoveel mogelijk benut worden.

- de laatste passagiers kunnen het best door stoptreinen worden vervoerd.

Een vervolgonderzoek zou zich kunnen richten op een model dat penalty's toekent aan het niet voldoen van de totale capaciteit van de treinen op elk moment van de alternatieve dienstregling. Het zou kunnen zijn dat hier een model uitkomt dat in korte tijd een goed oplossing kan geven.

11. Referenties

Caprara, A., M. Fischetti, P. Toth. 2002. Modeling and solving the train timetabling problem. *Operations Research* 50(5), pp. 851-861.

Jespersen-Groth, J., D. Potthoff, J. Clausen, D. Huisman, L.G. Kroon, G. Maróti, M.N. Nielsen. 2009. Disruption Management in Passenger Railway Transportation. *Robust and online large-scale optimization* vol. 5868, pp. 399-421.

Van der Knijff, K. (2010), Temporary Shuttle Services in Case of Major Disruptions of a Railway Network

12. Appendix: dienstregelingen scenario's

Scenario 1 Tweetrapsmodel:

Dienstregeling op station A

Tijd	Treinnummer	Treinformule	Richting
1	8	INTERCITY	VAN A NAAR B
1	2+7	INTERCITY	VAN A NAAR C
1	1	INTERCITY	VAN A NAAR D
4	3	STOPTREIN	VAN A NAAR B
4	4+6	STOPTREIN	VAN A NAAR C
4	5	STOPTREIN	VAN A NAAR D
29	1	INTERCITY	VAN A NAAR D
38	5	STOPTREIN	VAN A NAAR D
39	8	INTERCITY	VAN A NAAR B
43	2+7	INTERCITY	VAN A NAAR C
50	3	STOPTREIN	VAN A NAAR B
54	4	STOPTREIN	VAN A NAAR C
57	1	INTERCITY	VAN A NAAR D
77	8	INTERCITY	VAN A NAAR B

Dienstregeling op station B

Tijd	Treinnummer	Treinformule	Richting
20	8	INTERCITY	VAN B NAAR A
27	3	STOPTREIN	VAN B NAAR A
58	8	INTERCITY	VAN B NAAR A

Dienstregeling op station C

Tijd	Treinnummer	Treinformule	Richting
22	2+7	INTERCITY	VAN C NAAR A
29	6	STOPTREIN	VAN C NAAR A

Dienstregeling op station D

Tijd	Treinnummer	Treinformule	Richting
15	1	INTERCITY	VAN D NAAR A
21	5	STOPTREIN	VAN D NAAR A
43	1	INTERCITY	VAN D NAAR A

Scenario 2 Tweetrapsmodel:

Dienstregeling op station A

Tijd	Treinnummer	Treinformule	Richting
1	1+4+8	INTERCITY	VAN A NAAR C
1	5	STOPTREIN	VAN A NAAR B
1	6+7	STOPTREIN	VAN A NAAR D
4	2+3	STOPTREIN	VAN A NAAR C
35	6+7	STOPTREIN	VAN A NAAR D
43	1+4+8	INTERCITY	VAN A NAAR C
47	5	STOPTREIN	VAN A NAAR B
54	2+3	STOPTREIN	VAN A NAAR C
69	6+7	STOPTREIN	VAN A NAAR D

Dienstregeling op station B

Tijd	Treinnummer	Treinformule	Richting
24	5	STOPTREIN	VAN B NAAR A

Dienstregeling op station C

Tijd	Treinnummer	Treinformule	Richting
22	1+4+8	INTERCITY	VAN C NAAR A
29	2+3	STOPTREIN	VAN C NAAR A

Dienstregeling op station D

Tijd	Treinnummer	Treinformule	Richting
18	6+7	STOPTREIN	VAN D NAAR A
52	6+7	STOPTREIN	VAN D NAAR A

Scenario 3 Tweetrapsmodel:

Dienstregeling op station A

Tijd	Treinnummer	Treinformule	Richting
1	6	INTERCITY	VAN A NAAR B
1	3	INTERCITY	VAN A NAAR C
1	5+9	STOPTREIN	VAN A NAAR D
1	10	INTERCITY	VAN A NAAR E
1	1	INTERCITY	VAN A NAAR F
4	4	STOPTREIN	VAN A NAAR B
4	2+8	STOPTREIN	VAN A NAAR C
4	7	STOPTREIN	VAN A NAAR E
21	1	INTERCITY	VAN A NAAR F
31	10	INTERCITY	VAN A NAAR E
35	5+9	STOPTREIN	VAN A NAAR D
39	6	INTERCITY	VAN A NAAR B
43	3	INTERCITY	VAN A NAAR C
50	4	STOPTREIN	VAN A NAAR B
52	7	STOPTREIN	VAN A NAAR E
54	2+8	STOPTREIN	VAN A NAAR C
64	10	INTERCITY	VAN A NAAR E
69	9	STOPTREIN	VAN A NAAR D
77	6	INTERCITY	VAN A NAAR B
85	3	INTERCITY	VAN A NAAR C
94	10	INTERCITY	VAN A NAAR E
96	4	STOPTREIN	VAN A NAAR B
103	9	STOPTREIN	VAN A NAAR D
104	2+8	STOPTREIN	VAN A NAAR C
106	7	STOPTREIN	VAN A NAAR E
115	6	INTERCITY	VAN A NAAR B
124	10	INTERCITY	VAN A NAAR E
127	3	INTERCITY	VAN A NAAR C
137	9	STOPTREIN	VAN A NAAR D
142	4	STOPTREIN	VAN A NAAR B

Dienstregeling op station B

Tijd	Treinnummer	Treinformule	Richting
20	6	INTERCITY	VAN B NAAR A
27	4	STOPTREIN	VAN B NAAR A
58	6	INTERCITY	VAN B NAAR A
73	4	STOPTREIN	VAN B NAAR A
96	6	INTERCITY	VAN B NAAR A
119	4	STOPTREIN	VAN B NAAR A

Dienstregeling op station C

Tijd	Treinnummer	Treinformule	Richting
22	3	INTERCITY	VAN C NAAR A
29	3	INTERCITY	VAN C NAAR A
64	3	INTERCITY	VAN C NAAR A
79	3	INTERCITY	VAN C NAAR A
106	3	INTERCITY	VAN C NAAR A

Dienstregeling op station D

Tijd	Treinnummer	Treinformule	Richting
18	5+9	STOPTREIN	VAN D NAAR A
52	9	STOPTREIN	VAN D NAAR A
86	9	STOPTREIN	VAN D NAAR A
120	9	STOPTREIN	VAN D NAAR A

Dienstregeling op station E

Tijd	Treinnummer	Treinformule	Richting
16	10	INTERCITY	VAN E NAAR A
28	7	STOPTREIN	VAN E NAAR A
46	10	INTERCITY	VAN E NAAR A
79	10	INTERCITY	VAN E NAAR A
82	7	STOPTREIN	VAN E NAAR A
109	10	INTERCITY	VAN E NAAR A

Dienstregeling op station F

Tijd	Treinnummer	Treinformule	Richting
11	1	INTERCITY	VAN F NAAR A

Scenario 1 Uitgebreid Model:

Dienstregeling op station A

Tijd	Treinnummer	Treinformule	Richting
1	1+2+7	INTERCITY	VAN A NAAR B
1	4+5	INTERCITY	VAN A NAAR C
1	3+8	INTERCITY	VAN A NAAR D
4	6	STOPTREIN	VAN A NAAR D
29	3+8	INTERCITY	VAN A NAAR C
38	6	STOPTREIN	VAN A NAAR C
39	1+7	STOPTREIN	VAN A NAAR B
39	2	STOPTREIN	VAN A NAAR D
43	4+5	STOPTREIN	VAN A NAAR C
71	8	INTERCITY	VAN A NAAR B

Dienstregeling op station B

Tijd	Treinnummer	Treinformule	Richting
20	1+2+7	INTERCITY	VAN B NAAR A

Dienstregeling op station C

Tijd	Treinnummer	Treinformule	Richting
22	4+5	INTERCITY	VAN C NAAR A
50	8	INTERCITY	VAN C NAAR A

Dienstregeling op station D

Tijd	Treinnummer	Treinformule	Richting
15	3+8	INTERCITY	VAN D NAAR A
21	6	STOPTREIN	VAN D NAAR A

Scenario 2 Uitgebreid Model:

Dienstregeling op station A

Tijd	Treinnummer	Treinformule	Richting
1	4	INTERCITY	VAN A NAAR B
1	3+8	INTERCITY	VAN A NAAR C
1	1+2+5+6+7	STOPTREIN	VAN A NAAR D
35	1+2+7	INTERCITY	VAN A NAAR C
35	6	INTERCITY	VAN A NAAR D
39	4+5	STOPTREIN	VAN A NAAR C
43	3+8	STOPTREIN	VAN A NAAR C
63	6	STOPTREIN	VAN A NAAR B
82	7	STOPTREIN	VAN A NAAR D

Dienstregeling op station B

Tijd	Treinnummer	Treinformule	Richting
20	4	INTERCITY	VAN B NAAR A

Dienstregeling op station C

Tijd	Treinnummer	Treinformule	Richting
22	3+8	INTERCITY	VAN C NAAR A
60	7	INTERCITY	VAN C NAAR A

Dienstregeling op station D

Tijd	Treinnummer	Treinformule	Richting
18	1+2+5+6+7	STOPTREIN	VAN D NAAR A
49	6	INTERCITY	VAN D NAAR A

Scenario 3 Uitgebreid Model

Dienstregeling op station A

Tijd	Treinnummer	Treinformule	Richting
1	5	INTERCITY	VAN A NAAR B
1	2+3+4+6	INTERCITY	VAN A NAAR D
1	1+8+9+10	INTERCITY	VAN A NAAR E
1	7	INTERCITY	VAN A NAAR F
21	7	STOPTREIN	VAN A NAAR D
29	2+3+4+6	INTERCITY	VAN A NAAR B
31	1+9	INTERCITY	VAN A NAAR C
31	10	STOPTREIN	VAN A NAAR D
31	8	INTERCITY	VAN A NAAR E
41	5	INTERCITY	VAN A NAAR C
59	7	STOPTREIN	VAN A NAAR B
63	8	STOPTREIN	VAN A NAAR E
67	2+3+4+10	INTERCITY	VAN A NAAR C
67	6	STOPTREIN	VAN A NAAR E
74	1	STOPTREIN	VAN A NAAR C
81	9	STOPTREIN	VAN A NAAR C
86	5	STOPTREIN	VAN A NAAR C
106	7	STOPTREIN	VAN A NAAR E
109	2	STOPTREIN	VAN A NAAR C
110	4+10	STOPTREIN	VAN A NAAR B
112	3	INTERCITY	VAN A NAAR F
120	8	STOPTREIN	VAN A NAAR C
143	9	STOPTREIN	VAN A NAAR B

Dienstregeling op station B

Tijd	Treinnummer	Treinformule	Richting
20	5	INTERCITY	VAN B NAAR A
48	2+3+4+6	INTERCITY	VAN B NAAR A
83	7	STOPTREIN	VAN B NAAR A

Dienstregeling op station C

Tijd	Treinnummer	Treinformule	Richting
53	1	INTERCITY	VAN C NAAR A
60	9	INTERCITY	VAN C NAAR A
64	5	INTERCITY	VAN C NAAR A
88	2+3+4+10	INTERCITY	VAN C NAAR A
117	9	STOPTREIN	VAN C NAAR A

Dienstregeling op station D

Tijd	Treinnummer	Treinformule	Richting
15	2+3+4+6	INTERCITY	VAN D NAAR A
39	7	STOPTREIN	VAN D NAAR A
48	10	STOPTREIN	VAN D NAAR A

Dienstregeling op station E

Tijd	Treinnummer	Treinformule	Richting
16	1+8+9+10	INTERCITY	VAN E NAAR A
48	8	INTERCITY	VAN E NAAR A
95	6+8	STOPTREIN	VAN E NAAR A

Dienstregeling op station F

Tijd	Treinnummer	Treinformule	Richting
11	7	INTERCITY	VAN F NAAR A
164	3	INTERCITY	VAN F NAAR A